

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE
CHIMBORAZO**

FACULTAD DE MECÁNICA

ESCUELA DE INGENIERÍA DE MANTENIMIENTO



TESIS DE GRADO

**"ANÁLISIS DE FIABILIDAD DE EQUIPOS
ROTATIVOS DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA
PAUTE MOLINO"**

PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE:

INGENIERO DE MANTENIMIENTO

EDGAR DAVID CAMPOVERDE VIVANCO

RIOBAMBA - ECUADOR

2009

D E R E C H O S D E A U T O R Í A

El trabajo de grado que se presenta, es original y basado en el proceso de investigación y adaptación tecnológica establecida en la Facultad de Mecánica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. En tal virtud, los fundamentos teóricos científicos y los resultados son de exclusiva responsabilidad del autor. El patrimonio intelectual le pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

f) Edgar David Campoverde Vivanco

A G R A D E C I M I E N T O

En primer lugar quiero agradecer a Dios por ser la luz que me guió en mis estudios, la fortaleza en momentos de debilidad, la esperanza en los problemas de la vida y por su bendición que siempre me acompañó.

Agradezco a la planta docente de la Escuela de Ingeniería de Mantenimiento por los conocimientos que me supieron brindar a lo largo de mi carrera profesional.

De igual forma agradezco a CELEC HIDROPAUTE por brindarme la oportunidad de desarrollar mi tesis de grado y mis prácticas profesionales en la prestigiosa Central Hidroeléctrica Paute Molino.

D A C A M V I D .

DEDICATORIA

El presente trabajo lo quiero dedicar a mis padres: Máximo Campoverde, Mariana Vivanco, hermanas: Ligia, Beatriz, Lucía, Genny, familiares y amigos, quienes con un apoyo incondicional en cada momento, me han sabido animar e impulsar hacia el cumplimiento de mis metas y sueños de llegar a ser un buen profesional.

D A C A M V I D .

S U M A R I O

Esta tesis de grado está basada en el Análisis de Fiabilidad de Equipos Rotativos utilizando los registros de fallas detectadas mediante el diagnóstico de vibraciones en la Central Hidroeléctrica Paute Molino.

Se hace un estudio del comportamiento de vibraciones registradas desde el año 2001 hasta el año 2005 con el equipo medidor de impulsos de choque (SPM) y desde el año 2006 hasta el año 2009, se analiza los espectros registrados con el equipo DCX-XRT; dicho proceso se realizó de tal forma que nos permita elegir la unidad de generación más afectada por fallas.

Determinada la unidad más crítica se categorizó los equipos rotativos, de acuerdo a la norma ISO 2372, VDI 2056 y BS 4675, la misma que se complementa con la carta DLI, que es la guía de severidad de vibraciones del equipo analizador de vibraciones.

Obtenidos los rangos óptimos de buen estado técnico se realiza el análisis de espectros vibracionales para confirmar las fallas registradas, complementando los resultados generados, por el equipo analizador DCX.

Con los datos obtenidos se procedió a calcular los tiempos de buen funcionamiento los mismos que fueron ingresados al Software RELEST, en el cual

se calcula los índices de fiabilidad tales como: tasa de fallos, densidad de probabilidad de fallos, tiempo medio entre fallos, fiabilidad y desconfiabilidad; los mismos que nos permiten complementar las estrategias de mantenimiento, de tal forma que se gestione de forma óptima los recursos técnicos materiales y humanos del Departamento de Mantenimiento Mecánico.

TABLA DE CONTENIDOS

<u>CAPÍTULO</u>	<u>PÁGINA</u>
1. GENERALIDADES	
1.1. Introducción	1
1.2. Breve historia del problema	1
1.3. Reseña histórica de Proyecto Hidroeléctrico Paute	2
1.4. Justificación	4
1.5. Objetivos	5
2. MARCO TEÓRICO	
2.1. Central Hidroeléctrica Paute Molino	6
2.2. Equipos principales	7
2.3. Sistemas principales	11
2.4. Diagnóstico de vibraciones	17
2.5. Fiabilidad	28
2.6. Análisis de Weibull	37
2.7. Sistema Relest	38
3. DETERMINACIÓN DE LA UNIDAD DE GENERACIÓN MÁS AFECTADA POR FALLAS	
3.1. Determinación del comportamiento vibracional mediante el control de impulsos de choque con el equipo SPM	45
3.2. Determinación del comportamiento vibracional mediante el	

analizador de vibraciones de marca DLI, modelo DCX-XRT..	52
3.3. Comportamiento vibracional de las unidades de generación desde el año 2001 hasta el año 2009	63
4. ANÁLISIS DE FALLAS DETECTADAS EN LA UNIDAD 1	
4.1. Comportamiento vibracional del sistema de hidrogenación..	69
4.2. Comportamiento vibracional del sistema del transformador...	70
4.3. Diagnóstico del sistema de acumulación y bombeo	70
4.4. Diagnóstico del sistema de agua de enfriamiento	78
4.5. Diagnóstico del sistema de alta presión	81
4.6. Diagnóstico del sistema de frenos y gatos	85
4.7. Diagnóstico del sistema de ventilación	90
4.8. Diagnóstico del sistema de excitación	108
4.9. Análisis y discusión de resultados del diagnóstico vibracional	111
5. ANÁLISIS DE FIABILIDAD DE EQUIPOS ROTATIVOS	
5.1. Cálculo de fiabilidad del hidrogenador	116
5.3. Cálculo de fiabilidad de la motobomba de frenos y gatos	130

5.4.	Índices de fiabilidad de las motobombas y motocompresor de acumulación y bombeo... ..	135
5.5.	Índices de fiabilidad de las motobombas de agua de enfriamiento... ..	141
5.6.	Índices de fiabilidad de la motobomba de alta presión	149
5.7.	Índices de fiabilidad de los ventiladores del sistema de ventilación... ..	151
5.8.	Índices de fiabilidad de los ventiladores de excitación... ..	155
5.9.	Análisis y discusión de resultados de los índices de fiabilidad de equipos rotativos de la unidad 1... ..	159
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	
6.1.	Conclusiones... ..	166
6.2.	Recomendaciones... ..	167
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS... ..	170
	BIBLIOGRAFÍA... ..	172
	LINKOGRAFÍA... ..	174
	ANEXOS... ..	176

LISTA DE TABLAS

<u>TABLAS</u>	<u>PÁGINA</u>
I DATOS NOMINALES DEL GENERADOR	7
II DATOS NOMINALES DE LAS TURBINAS SEGÚN SU FASE	8
III PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DE LAS TURBINAS	8

IV	DATOS NOMINALES DEL TRANSFORMADOR PRINCIPAL... ..	10
V	PARÁMETRO DE FORMA WEIBULL ASOCIADO A LA CURVA DE LA BAÑERA	33
VI.	PARÁMETRO DE FORMA WEIBULL... ..	34
VII	REGISTRO DE FALLAS DETECTADOS POR EL MEDIDOR DE IMPULSOS DE CHOQUE EN LA UNIDAD 1... ..	46
VIII	REGISTRO DE FALLAS DETECTADOS POR EL MEDIDOR DE IMPULSOS DE CHOQUE EN LA UNIDAD 2... ..	46
IX	REGISTRO DE FALLAS DETECTADOS POR EL MEDIDOR DE IMPULSOS DE CHOQUE EN LA UNIDAD 3... ..	47
X	REGISTRO DE FALLAS DETECTADOS POR EL MEDIDOR DE IMPULSOS DE CHOQUE EN LA UNIDAD 4... ..	47
XI	REGISTRO DE FALLAS DETECTADOS POR EL MEDIDOR DE IMPULSOS DE CHOQUE EN LA UNIDAD 5... ..	48
XII	REGISTRO DE FALLAS DETECTADOS POR EL MEDIDOR DE IMPULSOS DE CHOQUE EN LA UNIDAD 6... ..	48
XII	REGISTRO DE FALLAS DETECTADOS POR EL MEDIDOR DE IMPULSOS DE CHOQUE EN LA UNIDAD 7	49
XIV	REGISTRO DE FALLAS DETECTADOS POR EL MEDIDOR DE IMPULSOS DE CHOQUE EN LA UNIDAD 8... ..	49
XV	REGISTRO DE FALLAS DETECTADOS POR EL MEDIDOR DE IMPULSOS DE CHOQUE EN LA UNIDAD 9... ..	50
XVI	REGISTRO DE FALLAS DETECTADOS POR EL MEDIDOR DE IMPULSOS DE CHOQUE EN LA UNIDAD 10... ..	50
XVII.	NÚMERO DE FALLAS DESDE EL AÑO 2001-2005... ..	51

XVIII.	REGISTRO DE FALLAS DETECTADOS POR EL ANALIZADOR DE VIBRACIONES EN LA UNIDAD 1...	52
XVIX	REGISTRO DE FALLAS DETECTADOS POR EL ANALIZADOR DE VIBRACIONES EN LA UNIDAD 2...	53
XX	REGISTRO DE FALLAS DETECTADOS POR EL ANALIZADOR DE VIBRACIONES EN LA UNIDAD 3...	54
XXI	REGISTRO DE FALLAS DETECTADOS POR EL ANALIZADOR DE VIBRACIONES EN LA UNIDAD 4...	55
XXII	REGISTRO DE FALLAS DETECTADOS POR EL ANALIZADOR DE VIBRACIONES EN LA UNIDAD 5	56
XXIII	REGISTRO DE FALLAS DETECTADOS POR EL ANALIZADOR DE VIBRACIONES EN LA UNIDAD 6...	57
XXXIV	REGISTRO DE FALLAS DETECTADOS POR EL ANALIZADOR DE VIBRACIONES EN LA UNIDAD 7...	58
XXXV	REGISTRO DE FALLAS DETECTADOS POR EL ANALIZADOR DE VIBRACIONES EN LA UNIDAD 8...	59
XXVI	REGISTRO DE FALLAS DETECTADOS POR EL ANALIZADOR DE VIBRACIONES EN LA UNIDAD 9...	60
XXVII	REGISTRO DE FALLAS DETECTADOS POR EL ANALIZADOR DE VIBRACIONES EN LA UNIDAD 10...	61

XXVIII	COMPORTAMIENTO DE LAS UNIDADES DE GENERACIÓN DESDE EL AÑO 2006 HASTA EL 2009... ..	62
XXIX	COMPORTAMIENTO DE LAS UNIDADES DE GENERACIÓN DESDE EL AÑO 2001 HASTA EL AÑO 2009... ..	63
XXX	CRITERIO DE SEVERIDAD DE LAS VIBRACIONES ACORDE CON LAS NORMAS ISO 2372, VDI 2056 Y BS 4675... ..	64
XXXI	GUÍA DE SEVERIDAD DLI... ..	
XXXII	RELACIONES Y CONVERSIÓN DE UNIDADES... ..	65
XXXIII	CONVERSIÓN DE VdB A mm/s... ..	66
XXXIV	CATEGORIZACIÓN DE EQUIPOS ROTATIVOS SEGÚN LA ISO 2372, VDI 2056, Y BS 4675... ..	67
XXXV	FRECUENCIA Y PORCENTAJES DE FALLOS DETERMINADAS... ..	111
XXXVI	FRECUENCIA Y PORCENTAJES DE FALLOS DE EQUIPOS ROTATIVOS POR SISTEMAS... ..	113
XXXVII	INSPECCIÓN VISUAL DEL HIDROGENERADOR... ..	116
XXXVIII	MEDICIÓN ELÉCTRICA DEL HIDROGENERADOR... ..	117
XXXIX	MEDICIÓN DE TEMPERATURA DEL HIDROGENERADOR... ..	117
XL	MEDICIÓN DE VIBRACIONES DEL HIDROGENERADOR... ..	118
XLI	PUNTAJE DE PRUEBAS Y MEDICIONES DEL HIDROGENERADOR...	119
XLII	PUNTAJE RESPECTO A LA EDAD DEL HIDROGENERADOR... ..	119
XLIII.	PUNTAJE RESPECTO AL MEDIO AMBIENTE DEL HIDROGENERADOR... ..	120
XLIV	PRODUCCIÓN DE LA UNIDAD DE GENERACIÓN 1... ..	121
XLV	PUNTAJE RESPECTO AL CICLO DE TRABAJO DEL HIDROGENERADOR... ..	121

XLVI	PUNTAJE CORRESPONDIENTE A LA FIABILIDAD PRÁCTICA DEL HIDROGENERADOR	122
XLVII	INSPECCIÓN VISUAL DE LAS MOTOBOMBAS DEL TRANSFORMADOR	123
XLVIII	MEDICIÓN ELÉCTRICA DE LAS MOTOBOMBAS DEL TRANSFORMADOR	124
XLIX	MEDICIÓN DE TEMPERATURA DE LAS MOTOBOMBAS DEL TRANSFORMADOR	125
L	MEDICIÓN DE VIBRACIONES DE LAS MOTOBOMBAS DEL TRANSFORMADOR	125
LI.	PUNTAJE CORRESPONDIENTES A LAS MEDICIONES DE LAS MOTOBOMBAS DEL TRANSFORMADOR	126
LII	PUNTAJE CORRESPONDIENTES A LA EDAD DE LAS MOTOBOMBAS DEL TRANSFORMADOR	127
LIII	PUNTAJE CORRESPONDIENTES AL MEDIO AMBIENTE DE LAS MOTOBOMBAS DEL TRANSFORMADOR	127
LIV	PUNTAJE CORRESPONDIENTES AL CICLO DE TRABAJO DE LAS MOTOBOMBAS DEL TRANSFORMADOR	128
LV	PUNTAJE CORRESPONDIENTES A LA FIAILIDAD PRÁCTICA DE LAS MOTOBOMBAS DEL TRANSFORMADOR	129
LVI.	INSPECCIÓN VISUAL DE LA MOTOBOMBA DE FRENOS Y GATOS	130

LVII	MEDICIÓN ELÉCTRICA DE LA MOTOBOMBA DE FRENOS Y GATOS...	131
LVIII	MEDICIÓN DE VIBRACIONES DE LA MOTOBOMBA DE FRENOS Y GATOS...	131
LIX.	PUNTAJE CORRESPONDIENTES LAS PRUEVAS Y MEDICIONES DE LA MOTOBOMBA DE FRENOS Y GATOS...	132
LX	PUNTAJE CORRESPONDIENTE A LA EDAD DE LA MOTOBOMBA DE FRENOS Y GATOS...	132
LXI	PUNTAJE CORRESPONDIENTE AL MEDIOAMIENTE DE LA MOTOBOMBA DE FRENOS Y GATOS...	133
LXII	PUNTAJE CORRESPONDIENTE A LA EDAD DE LA MOTOBOMBA DE FRENOS Y GATOS...	134
LXIII	PUNTAJE CORRESPONDIENTE A LA FIABILIDAD PRÁCTICA DE LA MOTOBOMBA DE FRENOS Y GATOS...	134
LXIV	RESULTADOS GENERALES DE EQUIPOS ANALIZADOS MEDIANTE LA FIABILIDAD PRÁCTICA...	159
LXV	RESULTADOS GENERALES DE EQUIPOS ANALIZADOS MEDIANTE LA DISTRIBUCIÓN DE WEIBULL...	161
LXVI	REPRESENTACIÓN PORCENTUAL SEGÚN LA SUB ETAPA DE LA FASE DESGASTE...	164

LISTA DE FIGURAS

<u>FIGURA</u>		<u>PÁGINA</u>
1	Proyecto hidroeléctrico Paute	3
2	Generador	7
3	Rueda hidráulica con los inyectores en el caracol de distribución	9
4	Transformador principal	10
5	Sistema de acumulación y bombeo	11
6	Válvula esférica	13
7	Distribución del agua de enfriamiento	13
8	Movimiento armónico simple (MAS)	17
9	Desplazamiento, velocidad, aceleración	19

10	Vibración de un cuerpo	20
11	Sistema vibratorio masa resorte	21
12	Sistema masa resorte con una viga articulada	23
13	Vibración amortiguada	24
14	Sistema masa resorte amortiguado	25
15	Curva de la Bañera	29
16	Función de densidad de probabilidad de fallas para la distribución Weibull	35
17	Función de tasa de fallas para la distribución Weibull	35
18	Función de fiabilidad para la distribución Weibull	36
19	Pantalla principal de retest	39
20	Ventana de opción de modelo	41
21	Ventana de tramas de probabilidad	42
22	Ventana de cálculo proyectado	43
23	Gráficos de índices de fiabilidad	44
24	Comportamiento vibracional con el equipo medidor de vibraciones SPM	51
25	Comportamiento vibracional determinado por el analizador DLI	62

26	Comportamiento vibracional determinado por los medidores SPM y DCX	63
27	Diagrama de Pareto de las fallas registradas	112
28	Diagrama de Pareto de las fallas de los equipos rotativos por sistemas	114
29	Índices de fiabilidad en función de tiempo de la motobomba 1 del sistema de acumulación y bombeo	136
30	Índices de fiabilidad en función de tiempo de la motobomba 2 del sistema de acumulación y bombeo	138
31	Índices de fiabilidad en función de tiempo del moto compresor del sistema de acumulación y bombeo	140
32	Índices de fiabilidad en función de tiempo de la motobomba 1 del sistema de agua de enfriamiento	142
33	Índices de fiabilidad en función de tiempo de la motobomba de refuerzo 1 del sistema de agua de enfriamiento	144
34	Índices de fiabilidad en función de tiempo de la motobomba 2 del sistema de agua de enfriamiento	146
35	Índices de fiabilidad en función de tiempo de la motobomba de refuerzo 2 del sistema de agua de enfriamiento	148
36	Índices de fiabilidad en función de tiempo de la motobomba del sistema de alta presión	150
37	Índices de fiabilidad en función de tiempo del ventilador B del sistema de ventilación	152

38	Índices de fiabilidad en función de tiempo del ventilador C del sistema de ventilación	154
39	Índices de fiabilidad en función de tiempo del ventilador E 42 del sistema de excitación	156
40	Índices de fiabilidad en función de tiempo del ventilador E 43 del sistema de excitación	158

LISTA DE ANEXOS

ANEXO 1: Estructura arbórea de la unidad de generación

ANEXO 2: Reglas para el análisis de espectros

ANEXO 3: Tolerancia recomendada para el alineamiento de acoples cortos, gravedad y
modelos de balanceo

ANEXO 4: Característica de la curva de Davies asociada al mantenimiento

CAPÍTULO I

1. GENERALIDADES

1.1. Introducción.

La Central hidroeléctrica Paute Molino es actualmente la de mayor capacidad de producción en el Ecuador, motivo por el cual se busca determinar la fiabilidad de equipos rotativos a través de los registros de fallas determinadas por el diagnóstico de vibraciones para así garantizar el proceso de gestión del mantenimiento.

La ciencia y tecnología va avanzando constantemente, por lo que debemos adaptarnos e introducir nuevas técnicas o combinación de ellas, en el área de mantenimiento, que nos permitan optimizar los recursos y tomar las mejores decisiones que determinan el mismo.

Las técnicas que se van a combinar es la del análisis de fiabilidad a través de un software computacional Relest y el análisis de vibraciones mediante la interpretación de espectros, técnicas que se pretende llevar a cabo en el departamento de mantenimiento mecánico; ya que las estrategias aplicadas no deben ejecutarse en forma independiente, si no deben complementarse.

1.2. Breve historia del problema.

La evolución del mantenimiento industrial, ha desarrollado nuevas técnicas de gestión y diagnóstico técnico de equipos, motivo por el cual Hidropaute en su Central Paute Molino por ser la mayor central del Ecuador debe estar actualizada en este desarrollo, de tal forma de garantizar la energía eléctrica que requiere nuestra nación.

Dentro del desarrollo del mantenimiento en el departamento de mantenimiento mecánico entre uno de los equipos de diagnóstico técnico, se utiliza el analizador de vibraciones, de marca DLI, modelo DCX-XRT, sistema que fue implantado por la empresa IVAN BHO MAN, el mismo que para adaptarse a objetivos del sistema de mantenimiento debía complementarse con respecto a la interpretación de espectros y análisis de fiabilidad en base a los tiempo de buen funcionamiento determinados mediante la técnica de análisis de vibraciones.

A partir del año 2009 el departamento de mantenimiento se proyecta a la gestión integral del mantenimiento, motivo por el cual se ve la necesidad de iniciar el proceso con el análisis de fiabilidad de las unidades de generación y sus sistemas, de tal forma de fortalecer el proceso de gestión, que ya fue iniciado.

1.3. Reseña histórica del proyecto Hidroeléctrico Paute Molino.

El proyecto fue creado por el ingeniero Daniel Palacios Izquierdo, el cual era superintendente de campo de la compañía británica Shelly y a él le asignaron el control de estudios geológicos y físicos en la parte oriental de Ecuador; posteriormente, como uno de los funcionarios del Centro de Reconversión Económica del Azuay Cañar y Morona Santiago (CREA), fue enviado en un recorrido durante el cual descubrió un accidente geográfico, el cual se aprovechó para la central hidroeléctrica.

Su proyecto era favorable debido a que el río en donde quería construir la planta era portador de un importante caudal en el sitio de "Cola de San Pablo", además el río era de gran medida y presentaba diferencias de niveles; pero para la época, el proyecto fue criticado por la magnitud de las obras, costos y además se calificaba al mismo como algo iluso.

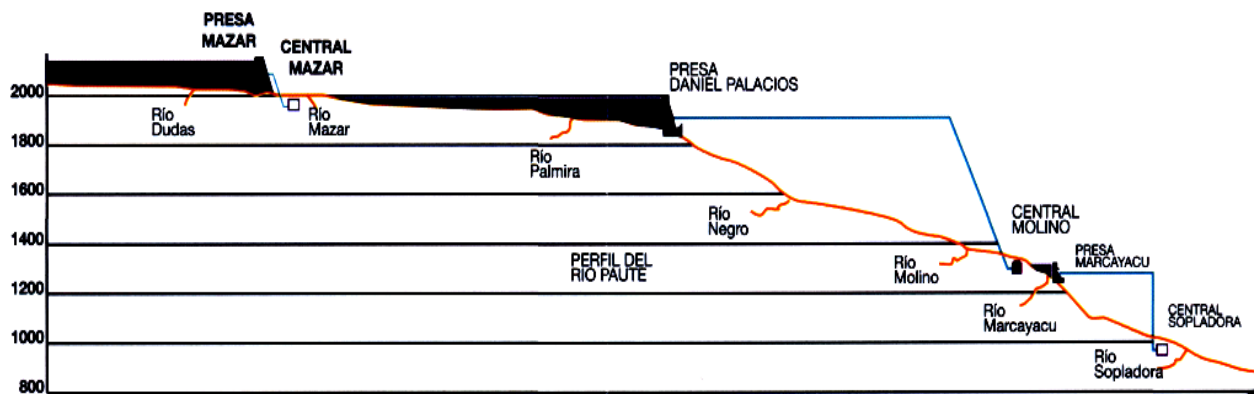


Figura 1. Proyecto hidroeléctrico Paute.

Sin embargo, Daniel Palacios insistió en su viabilidad y eso causó que el Directorio del CREA contratara una empresa norteamericana para realizar los inicios del proyecto en 1961.

INECEL, asociado de la empresa, encargado de la planificación y desarrollo de la electrificación, contrata los estudios del proyecto. La construcción de este proyecto se da en el periodo de 1976 a 1983 la fase AB; con una potencia eléctrica de 500 M W.; inaugurado por el presidente de la república Dr.: Osvaldo Hurtado y desde 1985 a 1991 la fase C; con una potencia eléctrica de 575 M W.; inaugurado por el presidente de la república Dr. Rodrigo Borja. Una de las ventajas que tenía el proyecto era que el país incrementó sus recursos debido a una exploración y explotación petrolera, en estas circunstancias el gobierno lo definió como ejecución prioritaria ya que es un recurso

beneficioso para el país, además de ser considerada una forma de "Sembrar el petróleo" en el sentido de que el capital logrado de la explotación del petróleo se invertiría en otras áreas de la economía nacional. El incremento de la extracción petrolera aportó a los planes maestros de la electrificación ya que utilizarían la energía hidráulica como un sustituto de los recursos no renovables.

La potencia hidroeléctrica de esta central es la de mayor producción y aporte para el Ecuador. Hidropaute en su Central Molino tiene una capacidad de producción de energía de 1.075 M W, sin embargo se tiene como proyecto incrementar su potencia de generación en: 180 M W, con la Central Mazar, 450 M W, con la Central Sopladora y 400 M W, con la Central Cardenillo, determinando un total 2105 M W, de potencia hidroeléctrica para el Ecuador. Actualmente la

operación y mantenimiento de la central está a cargo de la Corporación Eléctrica Ecuatoriana:

CELEC HIDROPAUTE.

1.4. Justificación.

Este trabajo se realiza con la finalidad de aportar al desarrollo del departamento de mantenimiento, utilizando el sistema informático RELEST, aplicado a fallas de componentes mecánicos, complementado con la norma ISO 10816 para el control de vibraciones en equipos rotativos y las reglas de interpretación de Vibraciones de espectros que nos permita verificar las fallas determinadas por el equipo analizador de vibraciones, ya que es un sistema informático que responde a una programación y base de datos determinada, las cuales deben ser revisadas y controladas por un analista de vibraciones.

Lo que se pretende es llevar una adecuada gestión del mantenimiento con los datos obtenidos mediante el análisis de vibraciones, de tal forma que además de identificar los fallos nos permita analizar la fiabilidad de los equipos rotativos de la unidad de generación, ya que la mayor cantidad de problemas mecánicos afectan los puntos soporte (cojinetes y rodamientos) de máquinas o equipos rotativos.

Con los tiempos de buen funcionamiento determinados mediante el análisis de Vibraciones se determinará: tasa de fallos, densidad de probabilidad de fallos, tiempo promedio entre fallos, fiabilidad y desconfiabilidad de los equipos.

1.5. Objetivos.

1.5.1. Objetivo general.

- Analizar la Fiabilidad de los Equipos Rotativos de la Central Hidroeléctrica Paute Molino.

1.5.2. Objetivos específicos:

- Determinar la unidad de generación que presente la mayor cantidad de fallas.
- Categorizar los equipos rotativos de los sistemas principales según las normas de severidad de vibraciones.
- Analizar los espectros de vibraciones para la determinación de la base de datos de los tiempos de buen funcionamiento entre fallas.
- Calcular los índices de fiabilidad en el sistema informático RELEST, de tal forma que nos permitan optimizar y gestionar técnicamente el mantenimiento.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Central Hidroeléctrica Paute Molino [1].

La casa de máquinas de la Central Hidroeléctrica Paute Molino, está constituida por 10 unidades de generación, que han sido instaladas en dos etapas de construcción denominadas Fase AB y Fase C. La estructura arbórea de la unidad de generación se puede ver en el ANEXO 1.

La Fase AB comprende 5 unidades de generación de 100 MW cada una, y la Fase C comprende 5 unidades de generación de 115 MW cada una. Por lo que en conjunto tenemos una potencia instalada de 1075 MW.

2.2. Equipos principales.

Entre los principales equipos que conforman las unidades de generación y casa de máquinas tenemos:

2.2.1. Generador Principal.

Los generadores principales son sincrónicos, trifásicos de eje vertical proyectados para funcionamiento continuo.

Los generadores de la Fase AB son de marca SIEMENS de fabricación alemana, y los generadores de la Fase C son de marca ANSALDO MARELLI de fabricación italiana.

Las características principales se presentan en el siguiente tabla:

TABLA I. DATOS NOMINALES DEL GENERADOR

CARACTERÍSTICAS GENERADORES	FASE AB	FASE C
Potencia	111 MVA	127.7 MVA
Tensión Nominal	13.8 Kv + 5 %	13.8 Kv + 5 %
Corriente Nominal	4643.9 A	5342.6 A
Factor de Potencia	0.9	0.9
Frecuencia	60 Hz	60 Hz
Número de fases	3	3
Clase de Aislamiento	B	F
Número de Polos	20	20
Conexión del Estator	Estrella	Estrella
Velocidad de Rotación	360 rpm	360 rpm
Temperatura de Funcionamiento	60 °C	60 °C

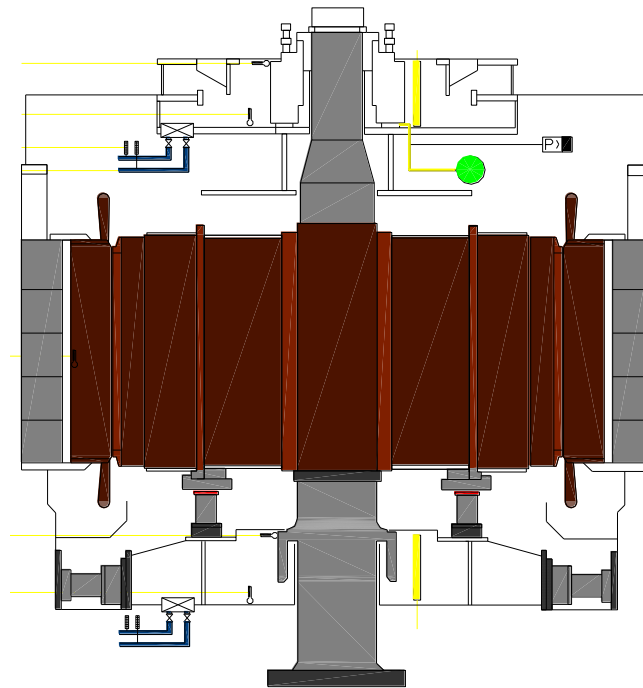


Figura 2. Generador

El generador es enfriado mediante un sistema aire-agua, que consiste de un doble anillo de tuberías, para envío y retorno de agua respectivamente, que a su vez conectan en paralelo 6 enfriadores ubicados entorno al generador. Con lo cual se enfría el aire en el interior del generador por convección. Este sistema trabaja con un caudal de agua de 331 m³/h, una presión de 7 kg/cm² y una temperatura de entrada inferior a los 25 °C.

2.2.2. Turbinas.

De acuerdo a las condiciones físicas de caudal y altura propias de la zona, se determinó el uso de turbinas Pelton de eje vertical para las dos fases.

Algunas características por fases:

TABLA II. DATOS NOMINALES DE LAS TURBINAS SEGÚN SU FASE

	FASE A B	FASE C
Caída neta de cálculo	667 m	657 m
Potencia, caída neta	120.400 KW	122.000 KW
Número de unidades	5	5

TABLA III. PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DE LAS TURBINAS

Tipo	Pelton , eje vertical
Elevación rodete de turbinas	1.323 m .s.n.m .
Número de Inyectores	6
Rendimiento	91.83 %
Rotación	Sentido horario visto desde el nivel superior
Peso	14.6 Ton
M aterial	13 % Cr, 4 % Ni
Fabricantes	Tosi Ansaldo
Número de alabes del rodete	22

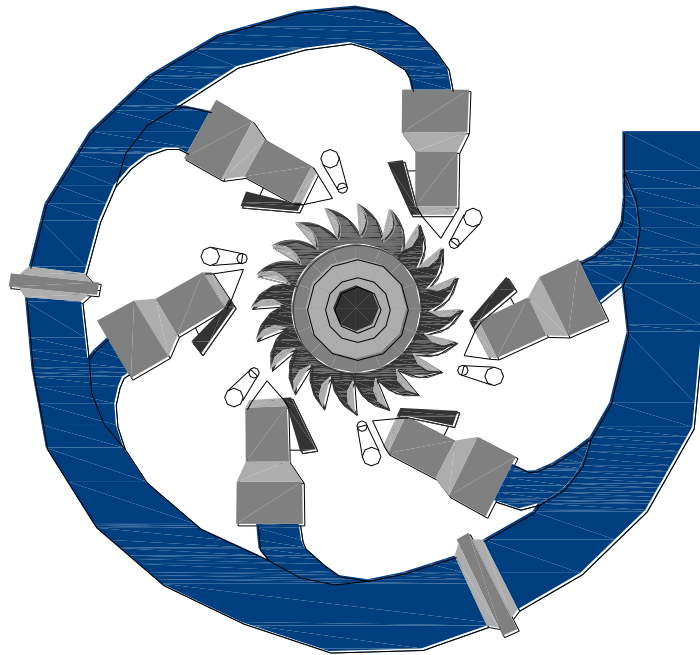


Figura 3. Rueda hidráulica con los inyectores en el caracol
de distribución

2.2.3. Transformador Principal.

Los transformadores principales en tanto en la Fase AB como en la Fase C elevan el voltaje de 13800 V, que es el voltaje de generación, a 138000 V en la Fase AB y a 230.000 V en la Fase C.

El transformador se compone de dos devanados dispuestos a partir del núcleo de la siguiente manera: Devanado de baja tensión y devanado de alta tensión.

El enfriamiento de los devanados se produce ya sea por ranuras horizontales, que permiten la circulación de aceite entre las bobinas o por las ranuras axiales colocadas en las partes anterior y posterior de los devanados.

El núcleo de los transformadores está constituido por laminaciones magnéticas con cristales orientados aislados con material denominado carlita. El enfriamiento del transformador (aceite y devanado) se realiza mediante la utilización de dos intercambiadores de calor con circulación forzada de aceite y agua. Entre las características principales de los transformadores principales tenemos las siguientes:

TABLA IV. DATOS NOMINALES DEL TRANSFORMADOR PRINCIPAL

CARACTERÍSTICAS	FASE AB	FASE C
Potencia Nominal	114 / 127 MVA	134 MVA
Relación de transformación	13.8 KV / 138 KV +3 x 2.5 % -1 x 2.5 %	13.8 KV / 246.3 KV 13.06 %
Frecuencia	60 ciclos	60 ciclos
Fases	3	3
Grupo de Conexiones	Yn d11	Yn d11
Peso Total	98500 Kg	118000 kg

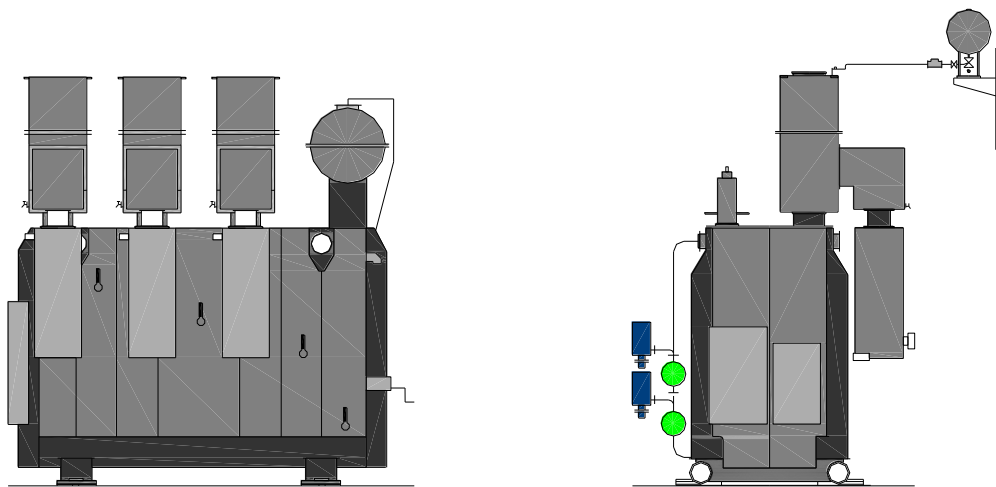


Figura 4. Transformador principal

2.3. Sistemas principales.

2.3.1. Sistema de regulación de velocidad.

En las turbinas Pelton de la Central Paute Molino, la regulación de la velocidad se la hace controlando el caudal de agua de alimentación al rodete y el caudal es regulado por el posicionamiento de los inyectores. Cada unidad tiene un sistema de regulación independiente que a más de controlar la posición de las agujas está dotado de un grupo de protecciones que garanticen la operación normal de la unidad y el control en caso de falla.

2.3.1.1. Subsistemas.

Se ha considerado tres subsistemas dentro del sistema de regulación: Uno el de acumulación y bombeo, el segundo el de regulación oleo dinámico y el tercero de válvula esférica.

2.3.1.1.1. Subsistema de acumulación y bombeo.

La generación de presión necesaria para actuar las agujas, deflectores y válvula esférica se encuentra en el sistema de acumulación y bombeo.

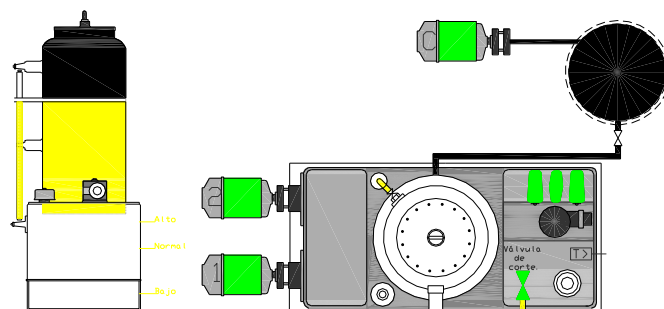


Figura 5. Sistema de acumulación y bombeo

2.3.1.1.2. Sistema de regulación óleo dinámico.

Dentro del centro automático, la regulación es un proceso, según el cual se mantiene un parámetro tal dentro de un rango de funcionamiento pre-establecido y de acuerdo a las conveniencias operativas de un sistema.

Los diferentes tipos de parámetros que pueden ser controlados o regulados así:
Temperatura, velocidad, posición, voltaje, caudal.

Los sistemas de control emplean en la regulación componentes eléctricos, electrónicos, mecánicos, hidráulicos, neumáticos y combinaciones de estos. Dependiendo de la exactitud, rapidez y estabilidad del control deseado será la complejidad del sistema de regulación.

Este sistema es una combinación de transmisiones hidráulicas y mecánicas que en conjunto cumplen con el trabajo de regulación.

2.3.2. Subsistema de válvula esférica.

Es un mecanismo que sirve para regular el flujo de un fluido canalizado y se caracteriza por tener forma de esfera perforada el mecanismo regulador situado en el interior.

La válvula esférica es el elemento de protección e interceptación entre la tubería de presión y la turbina, trabaja en posición abierta o cerrada, asegurando en el primer caso un flujo continuo con el mínimo de pérdida y en el segundo caso una estanqueidad total hacia el lado de la turbina.

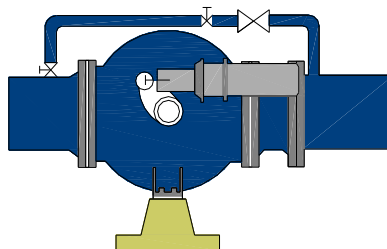


Figura 6. Válvula esférica

2.3.3. Sistema de refrigeración.

2.3.3.1. Sistema de refrigeración de la unidad.

Este sistema tiene la función de evacuar las calorías producidas por las pérdidas de los componentes mecánicos, eléctricos. Todo tipo de máquina que está en continuo movimiento utiliza algún sistema de enfriamiento, para preservar e incluso alargar el tiempo de vida útil, en el caso de las unidades de generación se aprovecha el agua turbinada, para su refrigeración.

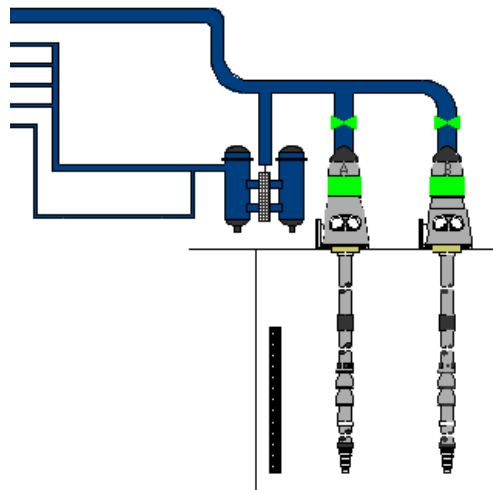


Figura 7. Distribución del agua de enfriamiento

2.3.3.2. Sistema de agua de enfriamiento para ventilación.

El sistema del agua de enfriamiento de ventilación es único para toda la Fase C de la Central Paute Molino y tomando el agua desde un pozo que se encuentra cerca a la unidad 6 alimentando: el conjunto de enfriadores existentes de la Fase A-B, para enfriar el aire de la casa de máquinas y las unidades de enfriamiento, ventilación de las cámaras de transformadores de las unidades de 6 a 10. El agua de enfriamiento es suministrada por dos electrobombas de eje vertical, instaladas en el pozo de enfriamiento del sistema de ventilación, que se encuentra cerca

de la unidad 6, a lado del canal de descarga de la turbina, frente al pozo de agua de enfriamiento de la misma unidad.

Cada bomba tiene un caudal de 612 m³/h y está en condiciones de suministrar toda la cantidad de agua que se necesita para el enfriamiento: trabajando una sola bomba a la vez, quedando la otra de reserva. Las bombas son del tipo centrífugo y están equipadas con campana cernidora de succión de malla de acero. El eje de cada bomba está provisto de cojinetes lubricados con aceite, alimentados por medio de un tanque con válvula de solenoide que se queda abierta cuando la bomba está en funcionamiento. Desde el colector de mando de las bombas el agua llega al filtro y después alimenta los circuitos de enfriamiento del sistema de ventilación.

2.3.4. Sistema de ventilación.

2.3.4.1. Ventilación área de la unidad.

El funcionamiento de equipos de una unidad de generación tiene pérdidas de energía y la disipación de estas es mediante el calor, el mismo que se transfiere al medio ambiente circundante; este calor del medio ambiente debe ser evacuado mediante la renovación de aire fresco, proporcionado por el sistema de ventilación.

El ventilador C (Área de la unidad) succiona aire fresco de la galería de cables (nivel 1341) y lo envía a través de ductos y difusores ubicados en los diferentes niveles y sectores de una unidad; en casa de máquinas; con una humedad relativa del 85 %.

2.3.4.2. Ventilación del área transformador principal unidad.

Con el objeto de mantener la temperatura ambiente del área del transformador en rangos aceptables, se ha instalado una unidad de ventilación; cuyo objetivo es hacer recircular aire dentro del recinto; a la vez que debe transferirse el calor del aire a una unidad de refrigeración.

El aire que es succionado por el ventilador B entra a través de unos difusores, ubicados sobre el transformador, pasa a través de unos damper obturador de incendios, un controlador de flujo de aire manual, filtros, enfriador y un eliminador de mezcla aire-agua. El aire es impulsado por el ventilador a través de un ducto a la misma área del transformador por medio de difusores. En el ducto de salida de aire también se encuentra ubicado el damper obturador de incendios.

2.3.5. Sistema de aire comprimido.

Está constituido por 3 líneas principales a la presión nominal de 6 bares, una en el lado norte de la Casa de Máquinas y dos en el lado sur.

La línea del lado norte, se distribuye a cada unidad en el piso de válvulas (excluida la Unidad 8), alimenta las tomas para las mangueras de 1", cada una equipada con válvula de globo de interceptación.

En el mismo modo una de las líneas del lado sur alimenta las tomas de 1" en correspondencia de cada unidad en los pisos de las turbinas, alternadores, (en este último están excluidas las Unidades 7 y 9), a los mandos de las válvulas mariposa del sistema de agua de enfriamiento.

miento de cada unidad y del sistema del agua de enfriamiento de ventilación, cerca de la Unidad 6.

La otra línea de lado sur provee el aire comprimido para los sistemas de frenado de las unidades de la 6 a la 10.

Todas las salidas de las dos líneas en el lado sur son para la alimentación de los mandos de las válvulas mariposa y de los sistemas de frenado, están provistas de válvulas de globo de 1", como las tomas de las mangueras.

2.3.6. Sistema de inyección de aceite de alta presión.

El sistema se utiliza para la inyección de aceite entre los patines y la cara de rodadura del cojinete combinado, está equipado de dos grupos de electro bombas, uno principal en C A y el otro de emergencia de CC. La inyección de aceite de los patines de empuje tiene que intervenir durante el arranque y paro de la unidad. El tipo de lubricación es hidrodinámico que garantiza la vida útil de los patines.

2.3.7. Sistema de frenado y levantamiento.

Se puede determinar una frenada programada por condiciones operativas, o una parada de emergencia por fallas en el generador. Los frenos mecánicos actúan al 20% de la velocidad nominal (72 rpm), mientras que un freno eléctrico, actúa al 6% de la velocidad nominal (22 rpm).

El frenado mecánico se basa en el roce de un anillo metálico y las 6 zapatas que han sido instaladas en los 6 gatos óleo neumáticos.

2.4. Diagnóstico de Vibraciones [2].

2.4.1. Conceptos y definiciones.

El movimiento periódico más simple es el movimiento armónico simple (MÁS) definido por la función armónica:

$$X = A \sin W t. \quad (1)$$

Donde:

A = Amplitud de onda de medio pico (mm, mils)

W = Frecuencia circular o angular de oscilación (Rad./seg.)

$T = 2\pi / W$ Periodo de oscilación (seg., min.)

$F = W / 2\pi$ Frecuencia de oscilación (cpm, Hz)

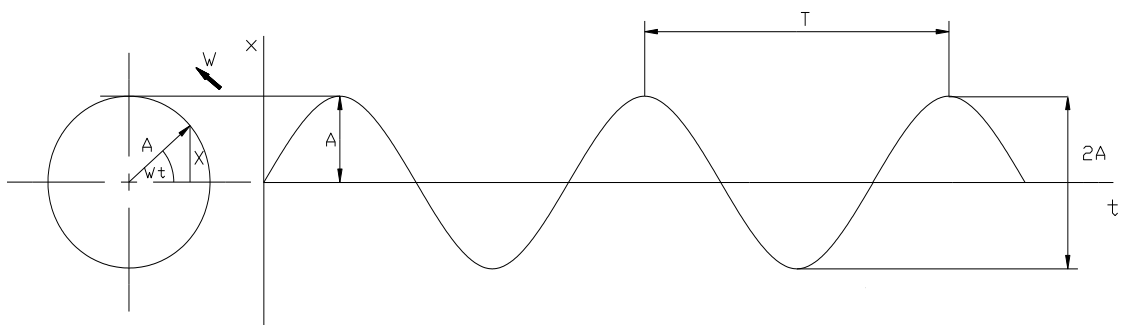


Figura 8. Movimiento Armónico Simple (MÁS)

2.4.1.1. Periodo (T). Es el tiempo requerido para que el sistema efectúe un ciclo completo, es decir cuando se demora un cuerpo en volver a su posición original con las condiciones iniciales, está expresado en minutos, segundos, etc.

2.4.1.2. Frecuencia (F). Es el número de ciclos por unidad de tiempo medido en ciclos por minuto (cpm) o ciclos por segundos (cps o Hz.) por tanto:

$$f = \frac{1}{T} \quad (2)$$

2.4.1.3. Amplitud. Es el desplazamiento de la onda a partir de la referencia 0, medida como pico-pico o rms.

En la función armónica el valor promedio en un ciclo es cero, por eso se utiliza el valor eficaz o valor rms de la onda:

- Valor pico (media onda) = Valor equivalente.
- Valor rms = Valor eficaz.
- Valor rms = 0.707 Valor equivalente.

2.4.1.4. Fase. Es una medida de diferencia de tiempo entre dos o más ondas senoidales. Aunque la fase es una medida de diferencia de tiempo, siempre se mide en términos de ángulo, en grados o radianes. Esta es una normalización del tiempo que requiere un ciclo de la onda sin considerar su verdadero periodo de tiempo.

En un movimiento armónico simple podemos definir, desplazamiento, velocidad, aceleración como indica la Figura 9.

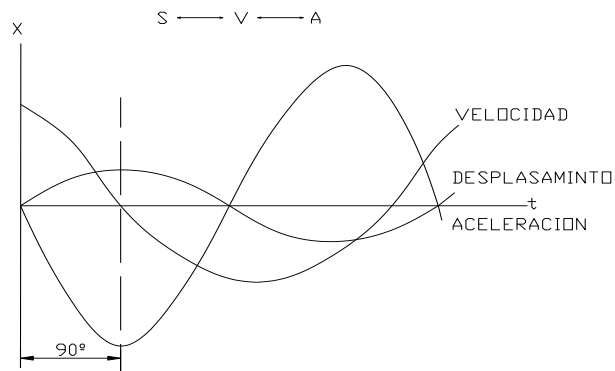


Figura 9. Desplazamiento, velocidad, aceleración

Donde:

- Desplazamiento $X = A \cdot \text{Sen } W t$ (3)
- Velocidad $V = A W \text{ Cos } W t$ (4)
- Aceleración $Ac = -A W^2 \text{ Sen } W t$ (5)

El desplazamiento (X) se obtiene a partir del círculo trigonométrico en la que se considera un ángulo ($W t$) como radio vector igual a la amplitud (A) y como cateto opuesto (X), aplicando la función seno de esta forma se obtiene la amplitud de la onda.

La velocidad constituye la primera derivada del desplazamiento.

La aceleración constituye la segunda derivada del desplazamiento o la primera derivada de la velocidad.

2.4.2. Principios básicos de vibraciones [3].

En otras palabras la vibración es el movimiento oscilatorio de vaivén de un cuerpo, a un lado y otro respecto a una posición de equilibrio.

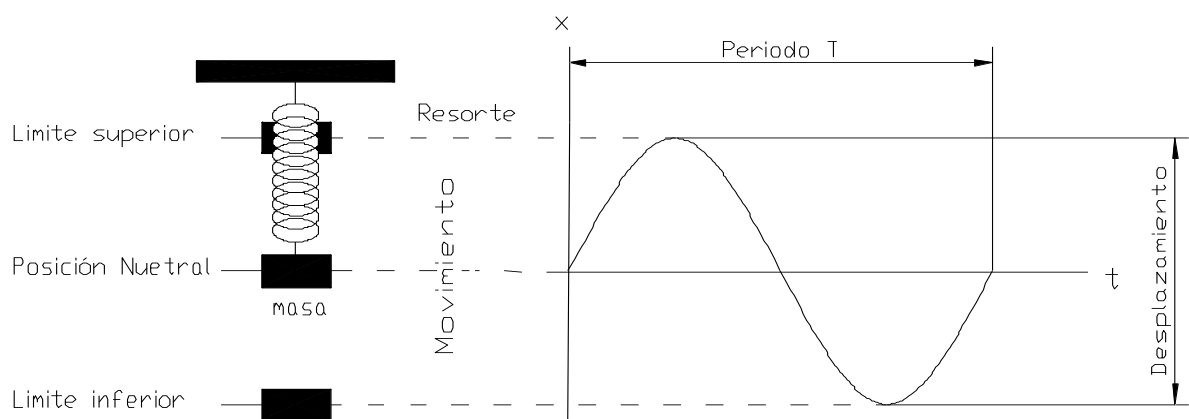


Figura 10. Vibración de un cuerpo

En el gráfico 10 se ve el conjunto masa resorte, actúa como el sistema vibratorio de una máquina en un ciclo de movimiento, la masa oscilante sube y baja, pasando por su posición de reposo.

Observando la oscilación como una función del tiempo, la posición de un punto genera una onda sinusoidal. El punto de inicio (Cuando la masa está en reposo) es el punto 0. Un ciclo completo de la masa muestra un desplazamiento positivo y otro negativo respecto de la referencia 0.

2.4.3. Tipos de vibraciones en máquinas [4].

Para que una vibración mecánica ocurra, se requieren por lo menos 2 elementos el elemento inercial (masa) y el elemento elástico (resorte).

Durante la vibración ocurre un intercambio de energía entre estos elementos, se dice que “todo sistema que posea masa y elasticidad es capaz de oscilar o vibrar”.

El modelo vibratorio más simple es el que muestra en la Figura 10, un sistema masa-resorte. La vibración puede ser de 3 tipos, libre, forzada y amortiguada. K = Constante de rigidez., m = masa.

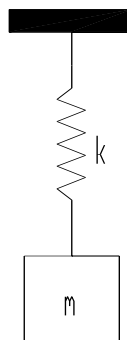


Figura 11. Sistema Vibratorio masa – Resorte

2.4.3.1. La vibración libre.

Es aquella que mantiene solamente las fuerzas inherentes de sistema (su elasticidad e inercia), las fuerzas externas son nulas.

Cuando esto ocurre la frecuencia de la vibración es la frecuencia natural que depende de la masa y elasticidad.

Se produce vibración libre en una máquina como reacción a un golpe o efecto de golpe. La frecuencia natural es inherente a cada máquina, a cada sistema y de un valor dado por el diseño, construcción y montaje.

Es decir la frecuencia Natural, es aquella que corresponde a la vibración de tipo libre, esta frecuencia depende de la masa y la elasticidad ya que no hay disipación de energía y no se ha tenido en cuenta el amortiguamiento.

En un sistema masa resorte como el de la Figura 11, aplicando la segunda ley de Newton, se encuentra la ecuación de movimiento siguiente:

$$m \ddot{x} + kx = 0$$

(6)

Esta ecuación diferencial homogénea de segundo orden, primer grado, de coeficientes constantes tiene como solución la ecuación:

$$X = A \operatorname{Sen} W_n t + B \operatorname{Cos} W_n t \quad (7)$$

Que es la suma de 2 funciones armónicas con frecuencia W_n llamada frecuencia natural.

$$W_n = \sqrt{k/m} \quad (8)$$

La frecuencia natural es una función de la masa y la elasticidad del sistema.

La respuesta sería un gráfico como el indicado en el movimiento armónico simple, con características de desplazamiento, velocidad y aceleración indicadas.

En definitiva, la respuesta de vibración libre de un sistema es una función armónica de frecuencia igual a la frecuencia natural.

Esta frecuencia natural es directamente proporcional a la masa e inversamente proporcional a la rigidez del sistema.

Cuando el sistema se complica un poco más, por ejemplo como en la viga articulada de peso despreciable, la frecuencia naturales:

$$\omega_n = \sqrt{k \cdot b^2 / m a^2} \quad (9)$$

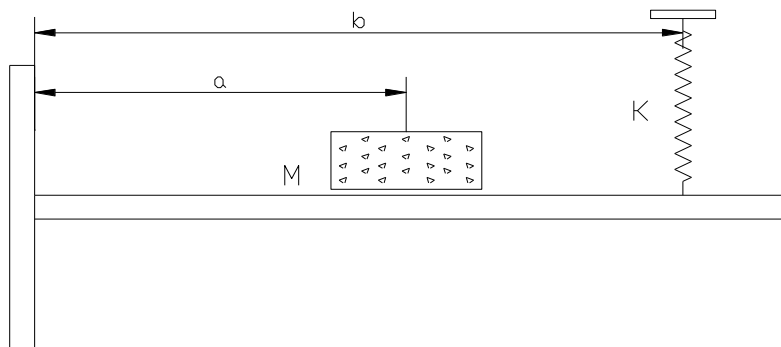


Figura 12. Sistema masa-resorte con una viga articulada

De manera que desplazar el peso o localizar el resorte en otro sitio implicaría un cambio de la frecuencia natural.

2.4.3.2. Vibraciones Amortiguadas.

Las consideraciones anteriores determinarían que la vibración libre es permanente, porque la función armónica no es decreciente en el tiempo, sin embargo ocurre que la vibración se va atenuando por el efecto llamado "amortiguamiento".

Entonces el amortiguamiento cumple con un efecto de disipación de energía. Básicamente existen 3 tipos de amortiguadores: viscosos, de fricción e histeréticos. Por ejemplo tenemos el caucho, una madera que son elementos que retiran la energía de vibración nociva de un equipo.

El efecto en vibración libre, es que la respuesta toma la forma de una senoide amortiguada, es decir la función armónica tiene un decrecimiento en el tiempo como se indica en la Figura 13.

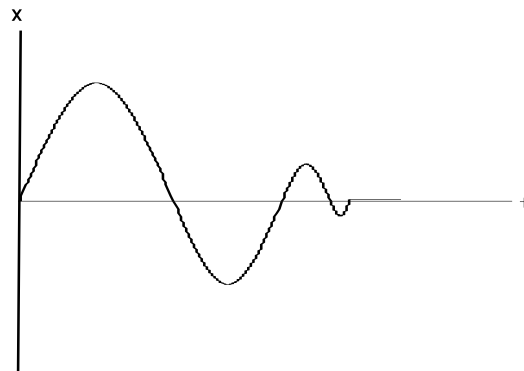


Figura 13. Vibración Amortiguada

2.4.3.3. La vibración forzada.

Puede ser de tipo periódico y no periódico, es excitada por fuerzas externas que se mantienen durante el movimiento. El cuerpo vibra a la frecuencia de la fuerza de excitación. Ocurre que si la frecuencia de excitación es igual a la frecuencia natural, el sistema entra en resonancia (la vibración crece al infinito).

La vibración forzada en un sistema rotativo puede ser el desbalanceo, el desalineamiento, las fuerzas reactivas a los movimientos alternativos de pistones en motores de combustión, en compresores, etc.

2.4.4. Frecuencia de excitación.

Un sistema vibratorio está sujeto a vibración forzada cuando tiene una excitación periódica como:

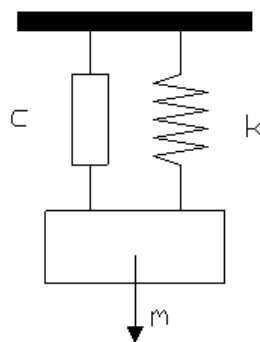


Figura 14. Sistema masa Resorte Amortiguado

$$P = P_0 \sin \omega t$$

Donde:

- P_o : Intensidad máxima de la fuerza de excitación
- W_f : Frecuencia forzada

El modelo más simple es un sistema masa resorte amortiguador sujeto a una fuerza armónica como en la Figura 14.

Aplicando la ley de Newton, se encuentra la siguiente ecuación diferencial.

$$m \cdot d^2 X + c \cdot dX + kX = P \cdot P_o \cdot \text{Sen } W_f t \quad (11)$$

Esta ecuación es básicamente la misma que la determinada en el análisis dinámico del rotor de Jeffcott para un eje y un disco inercial en rotación con desbalanceo.

En primer lugar simplifiquemos el problema resolviendo el caso de vibración forzada sin amortiguamiento:

$$m d^2 X + kX = P \cdot P_o \cdot \text{Sen } W_f t \quad (12)$$

La respuesta es:

$$X = P_o (k - m W_f^2) \text{ Sen } W_f t \quad (13)$$

Esta respuesta es la denominada de estado estable, y es la que permanece mientras esté presente la excitación.

Una conclusión muy importante del análisis es que la respuesta dinámica del sistema tiene la misma frecuencia que la excitación, esta es la base del análisis de vibraciones de maquinaria.

2.4.5. Evaluación e interpretación de resultados [2].

El estado de vibraciones normal de una máquina, es casi exclusivamente de esa máquina. Si bien existe espectros modelo en que se reflejan los picos en condiciones normales, para un caso en particular las condiciones pueden ser distintas, pueden excitarse vibraciones resonantes o de frecuencia natural de alguna parte cercana, por ejemplo del piso, de un pasamano o inclusive de una máquina cercana. El agravante es que las vibraciones se transmiten a través del piso o de miembros conectados, de manera que al tomar una muestra de vibración en una chumacera, rodamiento o cojinete de deslizamiento se está tomando realmente de todo el medio circundante. Cuando se necesita emitir un criterio y se presume de transmisión de vibraciones desde otras fuentes, se deben apagar las máquinas adyacentes e inclusive

desconectar la transmisión de otras partes de la misma máquina e ir haciendo pruebas por partes. El razonamiento anterior lleva a la conclusión, de que cada empresa debe desarrollar sus espectros, hacer un seguimiento del comportamiento de Vibraciones y sobre la base de los criterios desarrollados determinar los espectros que corresponden al funcionamiento normal y los que muestran existencia de defectos.

2.4.6. Generación de espectros de vibración - Resolución FFT.

Partiendo de las premisas:

- La respuesta dinámica de un sistema vibratorio tiene la misma frecuencia que la excitación.
- La vibración mecánica en maquinaria rotativa es una función periódica.
- Toda función periódica puede ser resuelta mediante el análisis de la transformada de Fourier. Llamando resolución a la determinación de los componentes armónicos.

Un analizador de vibraciones con resolución FFT (Fast Fourier Transformation), lo que hace es encontrar las funciones armónicas que generan la función periódica y mostrarlas en un gráfico en donde la abscisa es la frecuencia y la ordenada la intensidad de vibración, en amplitud, velocidad o aceleración, en valores de medio pico, rms, pico a pico, etc. El gráfico intensidad de vibración vs frecuencia se denomina espectro de vibración.

2.4.7. Como llevar un confiable análisis de tendencias.

- Se debe tomar las mediciones en el mismo punto.
- El analizador debe estar programado con los mismos parámetros de trabajo.

- Se debe seleccionar el transductor adecuado, esto depende básicamente del rango de frecuencias, el tipo de cojinete y la velocidad de la máquina,
- La máquina debe estar en el mismo régimen de funcionamiento en cuanto a la carga y parámetros externos (presiones, temperaturas, caudales, etc).
- Las rutas se deben realizar en los lapsos programados.

2.5. Fiabilidad.

La fiabilidad es la probabilidad de que las instalaciones, máquinas o equipos, se desempeñen satisfactoriamente sin fallar, durante un período determinado de tiempo, bajo condiciones específicas de trabajo para las cuales fueron diseñadas [5].

2.5.1. Fiabilidad de sistemas [6].

En la práctica nos encontramos con equipos, máquinas y sistemas complejos compuestos de muchas partes, dependientes unas de otras. Generalmente se utilizan 2 configuraciones básicas:

- Configuración en serie. En la configuración serie, cuando uno de los elementos falla. Trae consigo aparejado el fallo total del sistema. Entonces tendremos:

$$R_s = R_1 * R_2 * R_3 * ... * R_n = \prod_{j=1}^n R_j \quad (14)$$

- Configuración en paralelo. En la configuración en paralelo el sistema funciona siempre que funcione al menos uno de sus componentes. La falla se producirá únicamente cuando fallen todos sus elementos. Entonces tendremos:

$$R_p = 1 - \prod_{j=1}^n [1 - (R_j)] \quad (15)$$

- Configuración mixta. En la configuración mixta el sistema se comporta en función de la combinación serie y paralelo. Entonces tendremos:

$$R_{mix} = \left(\prod_{j=1}^n R_j \right) \times \left[1 - \prod_{j=1}^n (1 - R_j) \right] \quad (16)$$

2.5.2. Curva característica de fiabilidad y vida útil [7].

La fiabilidad puede ser considerada como el "control de calidad teniendo en cuenta el tiempo". Las características de fiabilidad de un artículo cambian con el tiempo. Una de las características es el índice de falla, o índice de riesgo el mismo que cambia con la edad o vida útil de un artículo y tiene tres períodos distintos: Período de adaptación, Periodo de vida útil y Periodo de desgaste, como se indica en la Figura 15.

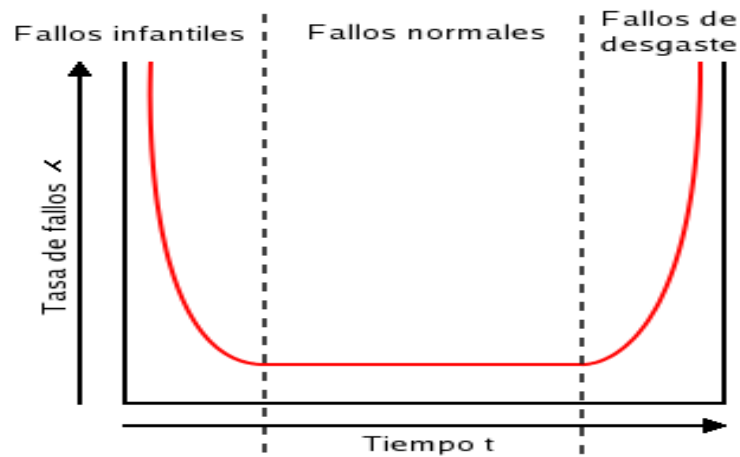


Figura 15. Curva de la Bañera

2.5.2.1. Periodo de fallas infantiles. Generalmente, la población total de artículos o de un sistema presenta un alto índice de falla relativamente alto en el principio, el cual decrece rápidamente. Por lo común este periodo inicial se le denomina período de "arranque", falla precoz o de depuración. La población de artículos tiene artículos "débiles" y estos fallan al principio. Para entender la naturaleza de estas fallas precoces se listan algunas de sus causas:

- Control de calidad deficiente.
- Materiales inferiores a los estándares.
- Técnicas de fabricación deficientes.
- Técnicas de manejo y procesos deficientes.
- Problemas debidos al ensamble.
- Contaminación.
- Instalación inadecuada.

- Inicio inadecuado.
- Error humano.
- Falla de partes por el almacenamiento.
- Métodos inadecuados de empaque y transporte

Muchas de estas fallas se deben al control de calidad; consecuentemente estas fallas se detectarán durante el control del proceso, en las pruebas durante el proceso o al final de éste, en las pruebas vitales, ambientales y otras. Muchos fabricantes prevén un periodo de arranque para sus artículos, de tal modo que estas fallas ocurran en la planta y no cuando el cliente los use.

2.5.2.2. Periodo de vida útil. Una vez realizada la prueba de inicio, la población de artículos alcanza su nivel más bajo de índice de falla, permaneciendo éste relativamente constante durante este período. El índice de falla está relacionado con la fiabilidad de diseño inherente del producto y, por lo tanto, se le da mayor importancia durante la fiabilidad del diseño. Constituye el periodo más significativo para la predicción de la fiabilidad y las actividades de evaluación. Algunas de las causas de estas fallas son las siguientes:

- Bajos factores de seguridad.
- Cargas imprevistas más altas que las esperadas.
- Resistencia aleatoria mas baja que la esperada.
- Defectos que no se pueden detectar mediante las técnicas disponibles.
- Errores humanos.
- Fallas que no se pueden observar durante el arranque.

- Fallas que no se pueden prevenir mediante las mejores prácticas de mantenimiento preventivo.
- Causas inexplicables.
- Fallas inesperadas o accidentales.

2.5.2.3. Periodo de desgaste. La mayoría de los artículos se diseñan para que tengan un periodo determinado de vida útil, consecuentemente empieza el período de desgaste. Después de este punto, el índice de falla aumenta rápidamente. El desgaste o deterioro se debe a cierto número de causas, químicas, físicas, mecánicas, algunas de las cuales son las siguientes:

- Corrosión u oxidación.
- Desgaste por fricción o fatiga.
- Envejecimiento o degradación.
- Deformación progresiva.
- Prácticas deficientes de mantenimiento.
- Corta vida de diseño.

2.5.3. Distribución de Weibull [8].


La distribución de Weibull fue desarrollada por el matemático sueco Waloddi Weibull en el año 1951, aplicada en su estudio de resistencia a la fatiga del acero, cuando trataba de encontrar

una distribución que describiera la expresión de fiabilidad en rodamientos de bolas, se caracteriza por su tasa de fallos que es variable.

Esta distribución está siendo utilizada con frecuencia para representar la vida de los componentes, pues posee ventajas sobre las otras distribuciones como técnicas gráficas sencillas para su aplicación práctica y que es la única función de probabilidad que puede usarse para representar cualquier tipo de tasa de falla.

El modelo probabilístico de Weibull es muy flexible, ya que permiten “ajustar” correctamente toda clase de resultados experimentales y operacionales. Contrariamente al modelo exponencial, la ley de Weibull cubre los casos en que la tasa de fallo λ es variable y permite por tanto ajustarse a los períodos de “juventud” y a las diferentes formas de “envejecimiento”, como se vio en la curva “bañera”.

La distribución de Weibull posee, en su forma general, tres parámetros lo que le da una gran flexibilidad. Ellos son:

- Parámetro de posición : el más difícil de estimar y por este motivo se asume con demasiada frecuencia que vale cero. Indica el lapso en el cual la probabilidad de falla es nula.

- Parámetro de escala o vida característica η : su valor es determinante para fijar la vida útil del producto o del sistema.
- Parámetro de forma β . El parámetro β permite a la distribución de Weibull tomar diversas formas, parámetros β menores a 1 son característicos de los equipos en períodos de mortalidad infantil (tasa de falla decreciente); cuando el valor es igual a uno, representa que el equipo está en su período de vida útil (tasa de falla constante y aleatoria); y con valores mayores a 1, significa que el equipo está en período de desgaste (tasa de falla creciente), a mayor β , mayor desgaste.

En la siguiente tabla se muestra un resumen de los períodos de la curva de la bañera, asociados al parámetro β de la distribución Weibull:

TABLA V. PARÁMETRO DE FORMA WEIBULL ASOCIADO A LA CURVA DE LA BAÑERA

Valor β	Característica
$\beta < 1$	Tasa de falla decreciente (Mortalidad infantil)
$\beta \cong 1$	Tasa de falla constante (Vida útil)
$\beta > 1$	Tasa de falla creciente (Desgaste)

En la siguiente tabla se puede observar las características del parámetro de forma de Weibull β con sus respectivas características.

TABLA VI. PARÁMETRO DE FORMA WEIBULL

Valor β	Característica
$0 < \beta < 1$	Tasa de falla decreciente. Distribución Gamma
$\beta = 1$	Distribución Exponencial
$1 < \beta < 2$	Tasa de Falla creciente, cóncava
$\beta = 2$	Distribución Lognormal
$\beta > 2$	Tasa de Falla creciente, convexa
$3 \leq \beta \leq 4$	Tasa de Falla creciente se aproxima a la distribución Normal; simétrica

2.5.3.1. Densidad de Probabilidad de Fallo f(t).

La función de densidad de probabilidad de falla, describe la forma de la distribución de fallas con respecto al tiempo.

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta^\beta} (t - \gamma)^{\beta-1} \exp \left[- \left(\frac{t - \gamma}{\eta} \right)^\beta \right] \quad \text{Siendo } t \geq \gamma \quad (17)$$

Donde:

β = Parámetro de forma. $\beta > 0$.

η = Parámetro de escala o vida característica $\eta > 0$.

t = Tiempo de estimación.

γ = Parámetro de localización o tiempo inicial.

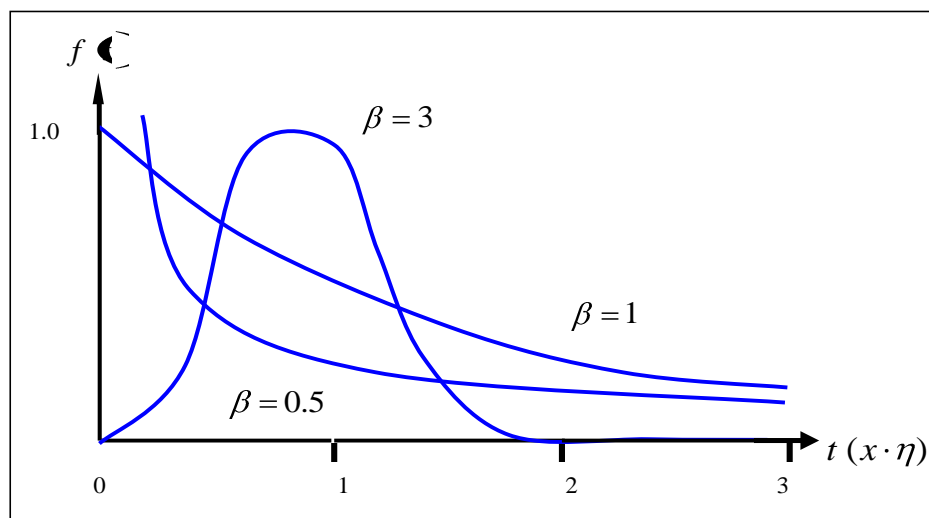


Figura 16. Función de densidad de probabilidad de fallas para la distribución Weibull

2.5.3.2. Tasa de Fallo $\lambda(t)$.

La tasa de falla es otra función usada con frecuencia en fiabilidad, además de las funciones de probabilidad definidas anteriormente. Ésta nos proporciona una tasa de falla instantánea en un momento t .

$$\lambda(t) = \frac{\beta (t-\gamma)^{\beta-1}}{\eta^\beta} \quad (18)$$

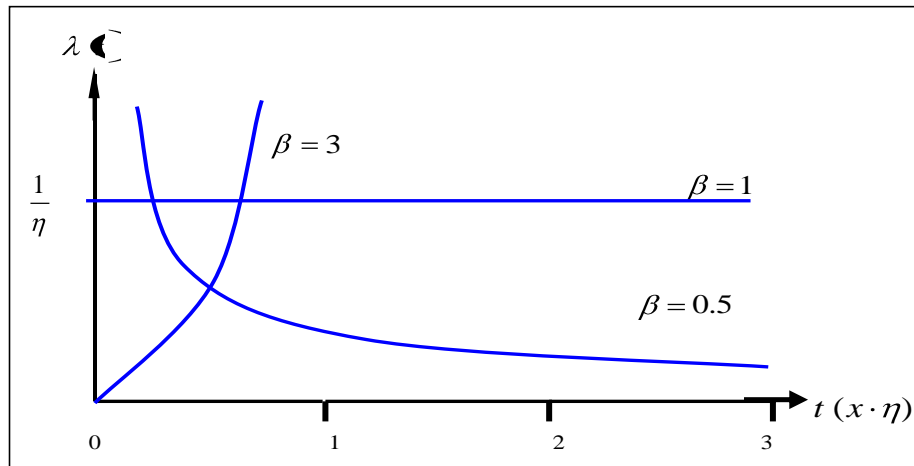


Figura 17. Función de tasa de fallas para la distribución Weibull

2.5.3.3. Probabilidad de trabajo con fallo $F(t)$.

Es la probabilidad de que un equipo falle antes de un tiempo t .

$$F(t) = 1 - R(t) \quad (19)$$

$$F(t) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{t-\gamma}{\eta} \right)^\beta \right] \quad (20)$$

Condiciones de la ecuación.

$$t - \gamma > 0$$

$$\eta \geq 0$$

$$\beta > 0$$

2.5.3.4. Probabilidad de trabajo sin fallo $R(t)$.

Es la probabilidad de trabajo sin fallo hasta un tiempo t .

$$R(t) = \exp \left[- \left(\frac{t - \gamma}{\eta} \right)^\beta \right] \quad (21)$$

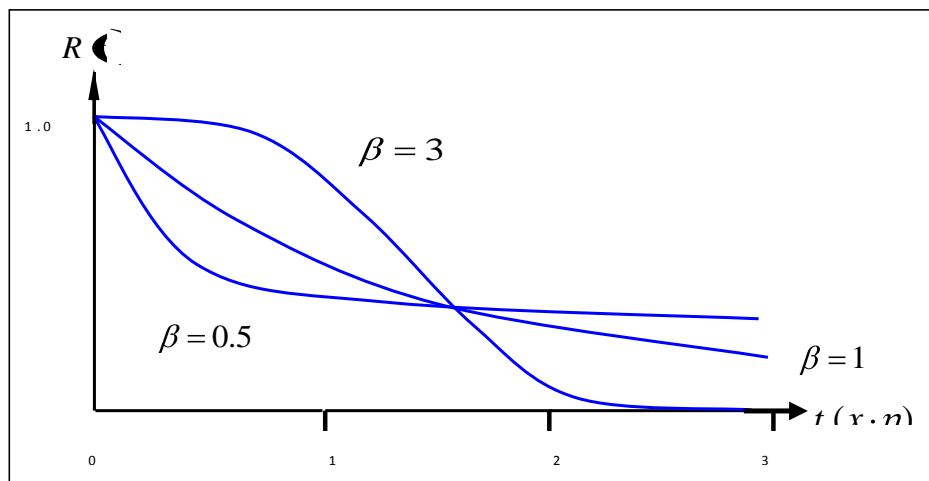


Figura 18. Función de fiabilidad para la distribución Weibull

2.5.3.5. Tiempo medio entre fallos "TMEF".

Mediante la ley de Weibull se establece para el cálculo de MTEF, al inverso del parámetro de forma β se aplica la función gamma y este valor se multiplica por la vida característica η , como se muestra en la siguiente ecuación.

$$MTEF = \eta * \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \quad (22)$$

$$MTEF = A * \eta + \gamma$$

Para determinar el tiempo medio entre fallas o media, se utiliza la ayuda del anexo 2, que muestra el valor de gamma (Γ), para los valores más comunes de parámetros de forma β .

En matemática, la función Gamma $\Gamma(z)$ es una función que extiende en concepto de factorial ($n!$) a los números complejos arbitrarios (z).

2.6. Análisis de Weibull.

Uno de los problemas fundamentales de la distribución de Weibull es la evaluación de los parámetros (t_0 , β , η) de esta distribución. Para ello se dispone de dos métodos: a través únicamente del cálculo mediante el método de los momentos o el de máxima verosimilitud, en el que intervienen ecuaciones diferenciales difíciles de resolver, por lo que se utilizan poco, y mediante la resolución gráfica, que utiliza un papel a escala

funcional llamado papel de Weibull o gráfico de Allen Plait. Actualmente se utiliza el método computacional o software que es lo que se va aplicar en el presente trabajo.

2.7. Sistema Relest [10].

2.7.1. Descripción de sistema: Relest.

Relest (cálculo de confiabilidad) es un sistema diseñado para que se ajuste a un modelo de distribución de datos de fallos. El sistema efectúa el análisis de muestras completas o censuradas y suministra los cálculos aproximados de los parámetros de distribución.

Además el sistema también provee las variaciones de parámetro y los intervalos de confianza correspondientes.

Después de determinar los parámetros de escala y forma, el sistema puede trazar la función de confiabilidad, la tasa de fallos, la función de densidad de probabilidad y la función de densidad acumulativa (Infiabilidad). También realiza cálculos puntuales de los parámetros mencionados.

2.7.2. Pantalla principal.

La fig.19 indica la pantalla principal (la aparición verdadera de la pantalla podría cambiar, dependiendo de la versión de Windows). La barra de menús encima de la pantalla principal puede ser accedida a través del teclado o el ratón.

La barra de menús de Relest indica cuatro menús:

- Archivo: nuevo archivo de datos/abrir archivo de datos/guardar datos/guardar como/imprimir/salir.
- Editar: editar datos/cortar/copiar/pegar/insertar hilera/eliminar hilera.
- Análisis: Barra de gráficos/trama de probabilidades/opción de modelo/distribución de prueba/gráficos/calidad de ajuste/tiempos característicos/cálculo prolongado.
- Ventana: clasifique o maximice una ventana abierta.

La barra de menús también constituye íconos que admiten el acceso rápido para los comandos más comúnmente usados, como Abrir, guardar, Imprimir, las tramas de probabilidad, opción de prueba del modelo de distribución, etc.

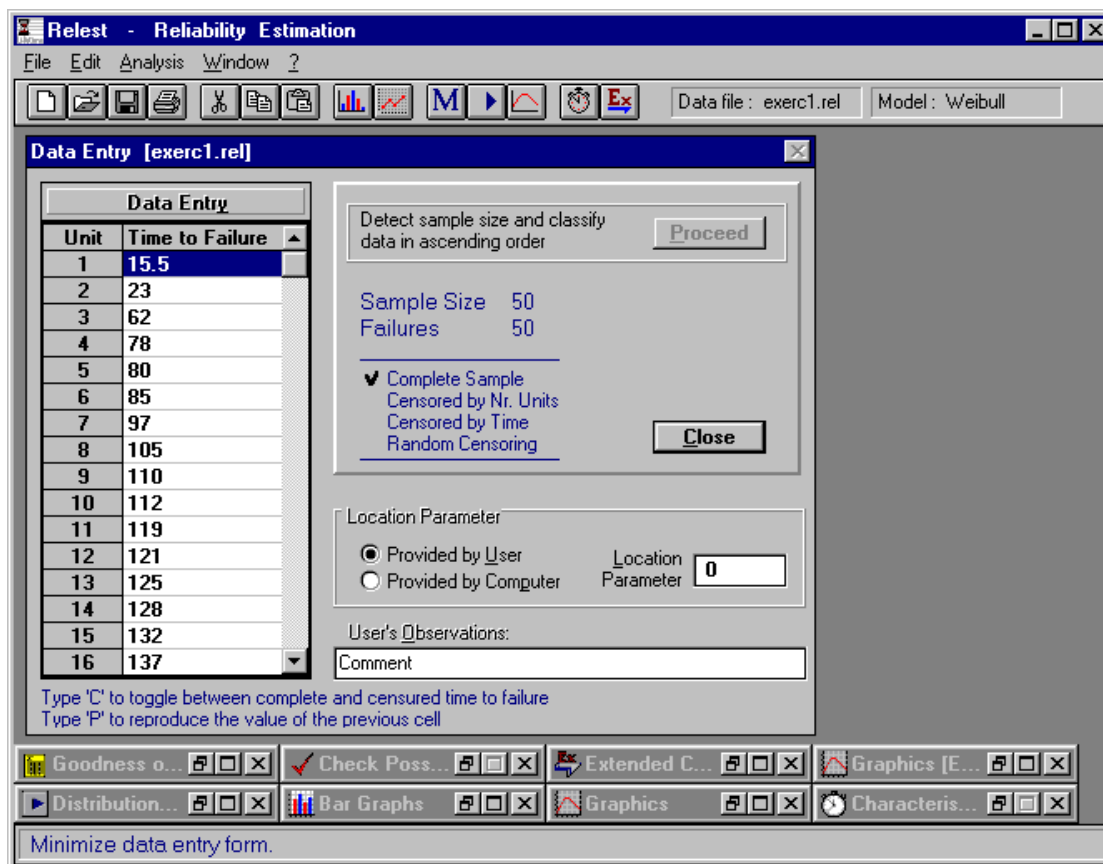


Figura 19. Pantalla principal de Reltest

2.7.3. Ingreso de datos.

Cuando Reltest es iniciado, la ventana de datos es presentada automáticamente con el propósito de que el usuario puede entrar los nuevos datos de tiempo de fallas en el campo respectivo, es decir en la tabla que aparece en el lado izquierdo de la pantalla. En el lado derecho de la pantalla hay un botón de Siga (Proceed.) Cuando el usuario presiona este botón, el sistema detecta el tamaño de muestra, la cantidad de fallos, y el tipo de datos.

En la ventana de datos también hay un campo para las observaciones del usuario y el otro para ingresar un parámetro de ubicación. El parámetro de ubicación es el cero (por defecto es cero) en la mayoría de los cuadros. Sin embargo, para modelos Exponencial y de Weibull, el usuario puede decidir quedar así o cambiarla. El parámetro de ubicación puede ser computado por el sistema o suministrado por el usuario.

Toda información entrada en la ventana de datos puede ser imprimida o salvada a un disco, así esto en cualquier momento el usuario puede recuperar los datos y repetir o continuar el análisis.

2.7.4. Opciones de modelo.

La elección del modelo es el próximo paso del análisis de confiabilidad. En estudios de confiabilidad, los modelos estadísticos más comúnmente usados son: Exponencial, Weibull, Gamma y Lognormal. El software incluye todos estos modelos.

Normalmente se utiliza el modelo Exponencial para fallas de tipo eléctrico y electrónico. El modelo de Weibull se aplica para fallas de tipo mecánico. El modelo Lognormal se utiliza para determinar el tiempo para completar alguna tarea y para fijar tiempos de reparación de componentes. El modelo Gamma se aplica para determinar intervalos de tiempo entre dos fallos y para determinar el tiempo de vida de sistemas electrónicos.

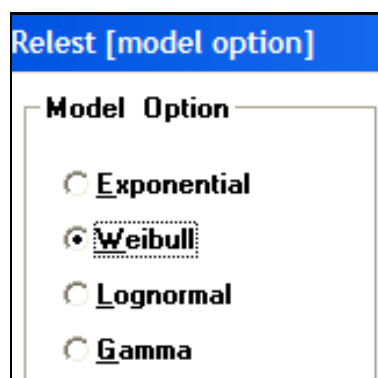
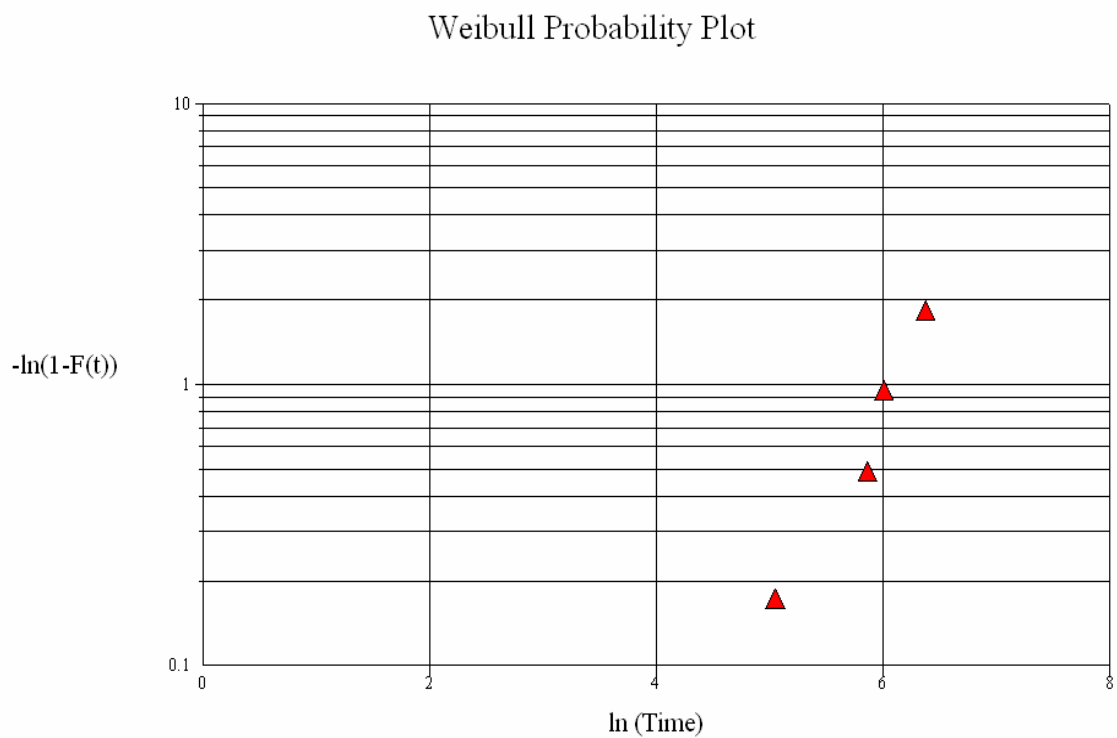


Figura 20. Ventana de opción de modelo

2.7.5. Gráficas de probabilidad.

Otra verificación visual de los tiempos de fallas puede ser obtenida usando las tramas de probabilidad provistas por el sistema. Las tramas Exponencial, de Weibull, y Lognormal están disponibles.

El análisis de las tramas de probabilidad también puede demostrar qué modelos probablemente pueden proveer un buen ajuste de los datos. Las tramas de probabilidad pueden ser imprimidas, salvado en un archivo.



Resultados: $\beta = 1.76$, $\eta = 443.737$ días y $MTTF = 395.027$ días.

Figura 21. Ventana de Tramas de probabilidad

2.7.6. Cálculos para diferentes tiempos.

La rutina de cálculos ejecuta un set de cálculos usuales en estudios de confiabilidad (Ver fig.20). Estos cálculos pueden ser llevados a cabo usando los parámetros computado por el sistema (a través de la rutina de prueba de distribución), o el usuario puede escoger un nuevo modelo de distribución y/o los nuevos parámetros. Usando la ventana de cálculos proyectados, los siguientes cálculos aproximados son obtenidos:

- M TTF;
- Desviación típica por los tiempos de fallo;
- Confiabilidad y tasa de fallos por un tiempo t en particular;
- Cálculo aproximado de tiempo para un nivel de confiabilidad en particular
- Gráficos para un modelo elegido y los parámetros;
- Tiempos característicos para un modelo elegido y los parámetros;

Los cálculos extendidos están disponibles desde el principio; no exige un archivo de datos y un accesorio de distribución previo.

Model Option

☐ Exponential
☐ Linear Exponential

☒ Weibull
☐ Lognormal

☐ Gamma

Fitted Parameters and Model
☐

Parameters

Location
Parameter:

Shape Parameter

β

Scale Parameter

n

Calc

Graph

Times

Close

R(t)

→

t = 449,171

t

→

R(t) = 0,74412
h(t) = 0,00234

Expected Values

Mean time to failure = 395,072
Standard deviation = 231,789

Figura 22. Ventana de cálculo proyectado

2.7.7. G r á f i c o s .

Una vez que la distribución ha sido ejecutada y los parámetros son computados, la rutina de gráficos está activada. Las tramas de sistema grafica las siguientes funciones: La Función de densidad de probabilidad; La función tasa de fallos; Función de confiabilidad; y función de probabilidad acumulativa.

Estas funciones son graficadas inicialmente en un arreglo al lado. Para Maximizar cualquiera de estas tramas, sólo haga doble clic en la trama correspondiente. Regresar al arreglo al lado, haga doble clic la trama otra vez.

Cualquiera de las tramas individuales puede ser imprimida, o guardadas en un disco. Use el comando guardar como para insertar el gráfico en los otros aplicaciones de Windows.

Por ejemplo, las tramas pueden ser insertadas en un informe escrito en un procesador de textos para el Windows, o pueden ser insertados en una base de datos que soporta imágenes.

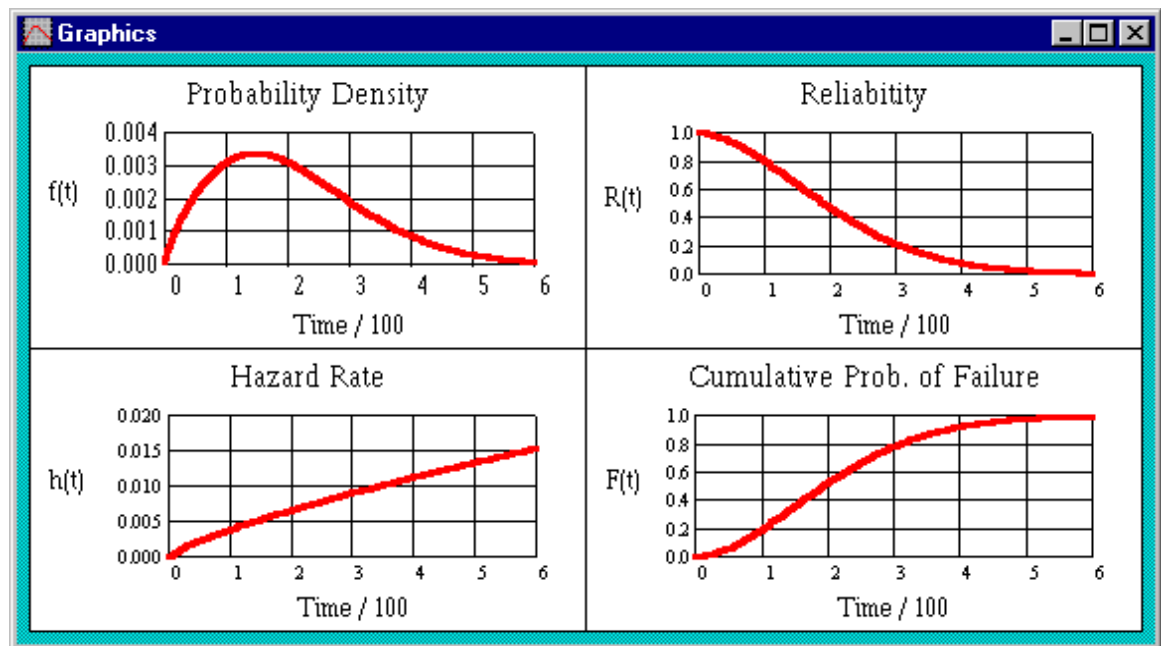


Figura 23. Gráficos de índices de Fiabilidad

CAPÍTULO III

3. DETERMINACIÓN DE LA UNIDAD DE GENERACIÓN MÁS AFECTADA POR FALLAS

3.1. Determinación del comportamiento vibracional mediante el control de impulsos de choque con el equipo SPM.

El medidor de impulsos de choque cuenta el índice de ocurrencia (impulsos de choque por segundo), determinando dos niveles de amplitudes:

- HR = Alto índice de ocurrencia, cuantifica el choque de cubierta (aprox. 1000 choques por segundo).

- LR = Bajo índice de ocurrencia, cuantifica los impulsos de choque fuertes (aprox. 40 choques por segundo)

Este método se utilizaba para el diagnóstico de la condición de los rodamientos, está basada en la norma ISO 2372 para el control de vibraciones mediante impulsos de choque. Permite un análisis preciso de la condición de la película del lubricante en la interfaz del rodamiento. LR y HR son valores “en bruto”, medidos en dBSv (valor de choque en decibelios). Una lubricación (dBC) de 0 significa funcionamiento en seco, el valor aumenta con el espesor de la película de lubricante.

Una condición de falla inicial es a partir de los 20 dBm , cuando llega a 30 dBm es falla moderada y cuando es mayor o igual a 35 dBm es crítica .

FR, significa falla registrada o fuera de rango del normal funcionamiento .

31.1 Comportamiento vibracional de las unidades de generación de la central Pate Milino desde el año 2001 hasta 2005, mediante los registros de la medición de impulsos de choque

TABLA VI. REGISTRO DE FALLAS DETECTADAS POR EL MEDIDOR DE IMPULSOS DE CHOQUE EN LA UNIDAD 1

Turbina Hidráulica	FR	Generador	FR	Transformador	FR	Agua de enfriamiento	FR	Acumulación y bombeo	FR	Inyección a alta presión	FR	Ventilación	FR	Excitación	FR
Cojinete	0	Cojinete	0	Motobomba 1	0	Motobomba 1	1	Motocompresor	2	Motobomba	14	Ventilador B	5	Ventilador E42	2
				Motobomba 2	0	Motobomba 1 de refuerzo	6	Motobomba 1	2			Ventilador C	17	Ventilador E43	1
						Motobomba 2	0	Motobomba 2	2						
						Motobomba 2 de refuerzo	5								
TOTAL PARCIAL	0		0		0		12		6		14		22		3
TOTAL FINAL	57														

TABLA VII. REGISTRO DE FALLAS DETECTADAS POR EL MEDIDOR DE IMPULSOS DE CHOQUE EN LA UNIDAD 2

Turbina Hidráulica	FR	Generador	FR	Transformador	FR	Agua de enfriamiento	FR	Acumulación y bombeo	FR	Inyección a alta presión	FR	Ventilación	FR	Excitación	FR
Cojinete	0	Cojinete	0	Motobomba 1	0	Motobomba 1	0	Motocompresor	0	Motobomba	24	Ventilador B	3	Ventilador E42	1
				Motobomba 2	0	Motobomba 1 de refuerzo	1	Motobomba 1	0			Ventilador C	9	Ventilador E43	0
						Motobomba 2	3	Motobomba 2	1						
						Motobomba 2 de refuerzo	1								
TOTAL PARCIAL	0		0		0		5		1		24		12		1
TOTAL FINAL	43														

TABLA IX REGISTRO DE FALLAS DETECTADAS POR EL MEDIDOR DE IMPULSOS DE CHOQUE EN LA UNIDAD 3

Turbina Hidráulica	FR	Generador	FR	Transformador	FR	Agua de enfriamiento	FR	Acumulación y bombeo	FR	inyección a alta presión	FR	Ventilación	FR	Excitación	FR
Coginere	0	Coginere	0	Motobomba1	0	Motobomba1	0	Motocompresor	5	Motobomba	24	Ventilador B	5	Ventilador E42	1
				Motobomba2	0	Motobomba1 de refuerzo	3	Motobomba1	0			Ventilador C	12	Ventilador E43	0
						Motobomba2	0	Motobomba2	0						
						Motobomba2 de refuerzo	0								
TOTAL PARCIAL	0		0		0		3		5		24		17		1
TOTAL FINAL	50														

TABLA X REGISTRO DE FALAS DETECTADOS POR EL MEDIDOR DE IMPULSOS DE CHOCUE EN LA UNIDAD 4

Turbina Hidráulica	FR	Generador	FR	Transformador	FR	Agua de enfriamiento	FR	Acumulación y bombeo	FR	inyección a alta presión	FR	Ventilación	FR	Excitación	FR
Coginere	0	Coginere	0	Motobomba1	0	Motobomba1	0	Motocompresor	5	Motobomba	17	Ventilador B	2	Ventilador E42	1

				Motobomba2	0	Motobomba1de refuerzo	1	Motobomba1	0			VentiladorC	2	Ventilador E43	0
						Motobomba2	2	Motobomba2	1						
						Motobomba2de refuerzo	2								
TOTAL PARCIAL	0		0		0		5		6		17		4		1
TOTAL FINAL	33														

TABLA VI. REGISTRO DE FALLAS DETECTADAS POR EL MEDIDOR DE IMPULSOS DE CHOQUE EN LA UNIDAD 5

Turbina Hidráulica	FR	Generador	FR	Transformador	FR	Agua de enfriamiento	FR	Acumulador y bombeo	FR	Inyección a alta presión	FR	Ventilación	FR	Excitación	FR
Cojinete	0	Cojinete	0	Motobomba1	0	Motobomba1	0	Motocompresor	3	Motobomba	26	Ventilador B	5	Ventilador E42	0
				Motobomba2	0	Motobomba1de refuerzo	3	Motobomba1	0			Ventilador C	7	Ventilador E43	0

[illegible]

TABLA XI. REGISTRO DE FALLAS DETECTADOS POR EL MEDIDOR DE IMPULSOS DE CHOQUE EN LA UNIDAD 6

Turbinas Hidráulicas	FR	Generador	FR	Transformador	FR	Aguade enfriamiento	FR	Acumulacion y bombeo	FR	Inyección alta presión	FR	Ventilación	FR	Excitación	FR
Cojinete	0	Cojinete	0	Motobomba1	0	Motobomba1	9	Motocompresor	1	MotobombaAC	1	Ventilador B	17	Ventilador inferior	1
				Motobomba2	0	Motobomba2	8	Motobomba1	1	MotobombaCC	0	Ventilador C	8	Ventilador superior	6
								Motobomba2	0						
TOTAL PARCIAL	0		0		0		17		2		1		25		7
TOTAL FINAL	52														

TABLA VII. REGISTRO DE FALLAS DETECTADOS POR EL MEDIDOR DE IMPULSOS DE CHOQUE EN LA UNIDAD 7

[illegible]

TABLA IV. REGISTRO DE FALLAS DETECTADOS POR EL MEDIDOR DE IMPULSOS DE CHOQUE EN LA UNIDAD 8

[illegible]

TABLA VI. REGISTRO DE FALLAS DETECTADOS POR EL MEDIDOR DE IMPULSOS DE CHOQUE EN LA UNIDAD 9

Turbina Hidráulica	FR	Generador	FR	Transformador	FR	Agua de enfriamiento	FR	Acumulación y bombeo	FR	Inyección a alta presión	FR	Ventilación	FR	Excitación	FR
Cojinete	0	Cojinete	0	Motobomba 1	0	Motobomba 1	10	Motocompresor	1	Motobomba AC	0	Ventilador B	8	Ventilador inferior	16
				Motobomba 2	0	Motobomba 2	3	Motobomba 1	3	Motobomba CC	0	Ventilador C	4	Ventilador superior	7
								Motobomba 2	2						
TOTAL PARCIAL	0		0		0		13		6		0		12		23
TOTAL FINAL	54														

TABLA VII. REGISTRO DE FALLAS DETECTADOS POR EL MEDIDOR DE IMPULSOS DE CHOQUE EN LA UNIDAD 10

Turbina Hidráulica	FR	Generador	FR	Transformador	FR	Agua de enfriamiento	FR	Acumulación y bombeo	FR	Inyección a alta presión	FR	Ventilación	FR	Excitación	FR
--------------------	----	-----------	----	---------------	----	----------------------	----	----------------------	----	--------------------------	----	-------------	----	------------	----

Cajinete	0	Cajinete	1	Motorbomba1	0	Motorbomba1	8	Motorcompresor	0	MotorbombaAC	0	VentiladorB	13	Ventiladorinterior	14
				Motorbomba2	0	Motorbomba2	7	Motorbomba1	2	MotorbombaCC	0	VentiladorC	14	Ventiladorsuperior	5
								Motorbomba2	0						
TOTAL PARCIAL	0		1		0		15		2		0		27		19
TOTAL FINAL	64														

3.1.2. Resultados del comportamiento vibracional mediante el control de impulsos de choque con el equipo SPM.

Según el comportamiento de vibraciones registrado mediante el equipo medidor de impulsos de choque, (SPM) aplicado en el seguimiento de las 10 unidades de generación, se observa que los equipos que más han registrado fallas son: la unidad 1 por la fase AB y la unidad 10 por la fase C. Esto se puede evidenciar en el siguiente cuadro:

TABLA XVII. NÚMERO DE FALLAS DESDE EL AÑO 2001-2005

UNIDAD	Unidad 1	Unidad 2	Unidad 3	Unidad 4	Unidad 5	Unidad 6	Unidad 7	Unidad 8	Unidad 9	Unidad 10
Fallas	57	43	50	33	49	52	52	45	54	61

Representando gráficamente el comportamiento de las unidades se tiene:

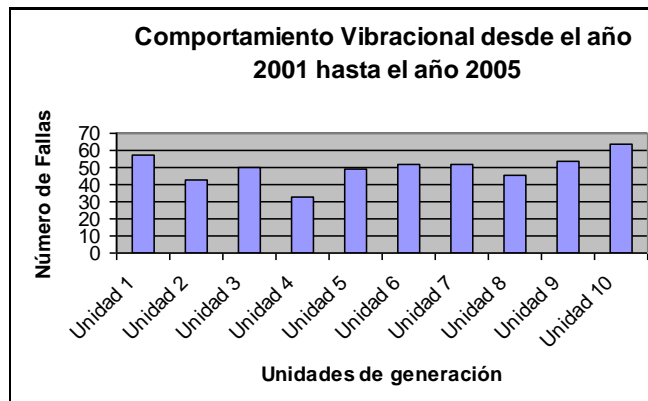


Figura 24. Com portam iento vibracional con el equipo m edidor de vibraciones SPM .

Cabe señalar que para la determinación de las fallas, se hizo referencia a la especificación del fabricante del equipo: Medidor de impulsos de choque (SPM), que la condición de daño de rodamientos empieza de 20 a 30 dBsv y es crítico a partir de los 35 dBsv, (Valor de choque en decibelios).

3.2. Determinación del comportamiento vibracional mediante el analizador de vibraciones de marca DLI, modelo DCX-XRT.

TABLA XVIII. REGISTRO DE FALLAS DETECTADAS POR EL ANALIZADOR DE VIBRACIONES EN LA

UNIDAD 1

Sistema	Fecha	Equipo	Falla
Acumulación y bombeo	04/11/2009	Moto bomba 1	Check motor bearings for improper fit.
	15/10/2008		Check motor bearings for improper fit.
	17/05/2007		Check motor bearings for improper fit.
	24/03/2007		Monitor pump bearings for increased vibration
		Moto bomba 2	No registra fallas

		Motocompresor	No registra fallas
Agua de enfriamiento		Motobomba 1	No registra fallas
		Motobomba de refuerzo 1	No registra fallas
	04/11/2009	Motobomba 2	Replace motor drive end bearing
		Motobomba de refuerzo 2	No registra fallas
Alta presión	14/04/2009	Motobomba	Check assembly for improper fit and alignment
	15/10/2008		Overhaul motor.
	31/10/2007		Check assembly for improper fit and alignment
	31/10/2007		Overhaul unit
	17/05/2007		Monitor bearings for increased vibration
Frenos y gatos	04/11/2009	Motobomba	Balance unit
	18/10/2008		Balance unit
	31/10/2007		Balance unit
	24/03/2007		Balance unit
	21/11/2006		Balance unit
Ventilación	04/11/2009	Ventilador B	Monitor fan bearings for increased vibration
	15/10/2008		Monitor motor bearings for increased vibration
			Monitor fan bearings for increased vibration
	31/10/2007		Clean and inspect fan rotor and balance if necessary
			Check driven sheave for runout and eccentricity
			Monitor fan bearings for increased vibration
	17/05/2007		Perform motorelectrical checks and monitor motor for increased vibration
	25/03/2007		Monitor fan bearings for increased vibration
	04/11/2009	Ventilador C	Monitor fan bearings for increased vibration
	31/10/2007		Monitor fan bearings for increased vibration

	25/03/2007		Replace fan bearings
Excitación	05/01/2009	Ventilador E42	Balance unit.
	18/10/2008		Inspect fan wheel; repair or replace fan wheel
	05/01/2009	Ventilador E43	Balance unit.
Transformador			No registra fallas
Hidrogenerador			No registra fallas

Total de fallas: 26.

TABLA XIX. REGISTRO DE FALLAS DETECTADAS POR EL ANALIZADOR DE VIBRACIONES EN LA
UNIDAD 2

Sistema	Fecha	Equipo	Falla
Acumulación y bombeo		Motobomba 1	No registra fallas
	17/11/2005	Motobomba 2	Monitor motor bearings for increased vibration
	17/02/2009	Motocompresor	Monitor motor bearings for increased vibration
	01/11/2008		Monitor motor bearings for increased vibration
	24/03/2007		Monitor motor bearings for increased vibration
	10/04/2006		Monitor motor bearings for increased vibration
	14/11/2005		Monitor motor bearings for increased vibration
Agua de enfriamiento		Motobomba 1	No registra fallas
		Motobomba de refuerzo 1	No registra fallas
	07/11/2008	Motobomba 2	Check motor thrust bearing fit

	18/07/2007		Balance motor
	22/03/2007		Overhaul motor
	29/12/2006		Balance motor
		Motobomba de refuerzo	No registra fallas
Alta presión	17/02/2009		Overhaul motor.
			Check assembly for improper fit and alignment
	07/11/2008		Monitor motor for increased vibration and perform electrical checks
	18/07/2007		Monitor motor for increased vibration and perform electrical checks
	24/03/2007		Check assembly for improper fit and alignment
	19/11/2005		Check assembly for improper fit and alignment
Frenos y gatos	21/02/2009		Balance unit.
	22/10/2006		Balance unit.
Sistema de ventilación	16/11/2005	Ventilador B	Check belt for wear and incorrect tension
			Monitor fan bearings for increased vibration
		Ventilador C	No registra fallas
Excitación		Ventilador E42	No registra fallas
		Ventilador E43	No registra fallas
Transformador			No registra fallas
Hidrogenerador	10/12/2006		Check turbine rotor for improper clearances and nozzle wear
	10/08/2006		Monitor turbine bearings for increased vibration

Total de fallas: 22

TABLA XX. REGISTRO DE FALLAS DETECTADAS POR EL ANALIZADOR DE VIBRACIONES EN LA

U N I D A D 3

Sistema	Fecha	Equipo	Falla
Acumulación y bombeo		Motobomba 1	No registra fallas
	23/05/2008	Motobomba 2	Check motor bearings for improper fit.
	02/04/2009	Motocompresor	Check motor bearings for improper fit.
	12/02/2007		Replace motor bearings
	25/03/2007		Monitor motor bearings for increased vibration
	10/04/2006		Check motor bearings for improper fit.
Agua de enfriamiento	10/04/2006	Motobomba 1	Monitor all motor bearings for increased vibration
	17/11/2005		Monitor all motor bearings for increased vibration
		Motobomba de refuerzo 1	No registra fallas
		Motobomba 2	No registra fallas
		Motobomba de refuerzo 2	No registra fallas
Alta presión	02/04/2009		Monitor motor for increased vibration and perform electrical checks
	12/02/2007		Check assembly for improper fit and alignment
	22/11/2005		Check assembly for improper fit and alignment

	21/11/2005		Replace bearings and verify proper mechanical fit
Frenos y gatos			No registra fallas
Ventilación	02/04/2009	Ventilación B	Check belt for wear and incorrect tension
	23/05/2008		Check belt for wear and incorrect tension
			Monitor fan bearings for increased vibration
	12/12/2007		Monitor motor for increased vibration
			Check belt for wear and incorrect tension
			Monitor fan bearings for increased vibration
	06/06/2007		Monitor motor bearings for increased vibration
	26/03/2007		Clean and inspect fan rotor and balance if necessary
			Check belt for wear and incorrect tension
			Check driven sheave for runout and eccentricity
	25/03/2007		Monitor motor bearings for increased vibration
			Monitor fan bearings for increased vibration
	15/11/2005		Check belt for wear and incorrect tension
			Monitor fan bearings for increased vibration
		Ventilación C	No registra fallas
Excitación	02/07/2009	Ventilador E 42	Inspect fan wheel; repair or replace fan wheel
	02/07/2009	Ventilador E43	Balance unit.
Transformador			No registra fallas
Hidrogenerador	10/12/2006		Inspect generator thrust bearing for wear

Total de fallas: 28

TABLA XXI. REGISTRO DE FALLAS DETECTADAS POR EL ANALIZADOR DE VIBRACIONES EN LA

U N I D A D 4

Sistema	Fecha	Equipo	Falla
Acumulación y bombeo	23/05/2009	Motobomba 1	Monitor motor bearings for increased vibration
	23/05/2007		Monitor motor bearings for increased vibration
	10/05/2006		Monitor motor bearings for increased vibration
	22/05/2009	Motobomba 2	Monitor motor bearings for increased vibration
	16/11/2007		Monitor motor bearings for increased vibration
	15/01/2009	Motocompresor	Check motor bearings for improper fit
	23/05/2007		Check motor bearings for improper fit.
			Inspect coupling for wear
	25/03/2007		Check motor bearings for improper fit
Agua de enfriamiento	25/03/2007	Motobomba 1	Monitor motor drive end bearing for increased vibration
		Motobomba de refuerzo 1	No registra fallas
		Motobomba 2	No registra fallas
		Motobomba de refuerzo 2	No registra fallas
Alta presión	15/01/2009		Overhaul motor.
	24/05/2007		Check assembly for improper fit and alignment
Frenos y gatos	16/01/2009		Balance unit
	22/10/2006		Balance unit

Ventilación	15/01/2009	Ventilación B	Check driven sheave for runout and eccentricity
			Clean and inspect fan rotor and balance if necessary
	23/05/2007		Clean and inspect fan rotor and balance if necessary
	26/03/2007		Check driven sheave for runout and eccentricity
	10/05/2006		Clean and inspect fan rotor and balance if necessary
			Check belt for wear and incorrect tension
			Check driven sheave for runout and eccentricity
		Ventilation C	No registra fallas
Excitación			No registra fallas
Transformador			No registra fallas
Hidrogenerador	10/12/2006		Inspect generator drive end bearing for wear and improper clearances
			Overhaul turbine.
	09/07/2006		Overhaul turbine.
			Inspect generator drive end bearing for wear and improper clearances

Total de fallas: 25.

TABLA XXII. REGISTRO DE FALLAS DETECTADAS POR EL ANALIZADOR DE VIBRACIONES EN LA UNIDAD

5

Sistema	Fecha	Equipo	Falla
Acumulación y bombeo	02/01/2009	Motobomba 1	Overhaul motor.
			Inspect coupling for wear
	14/03/2007		Check motor bearings for improper fit
	29/1/2009	Motobomba 2	Overhaul motor.
	08/08/2008		Monitor motor bearings for increased vibration
	13/02/2008		Overhaul motor.
	19/10/2006		Monitor motor bearings for increased vibration
	14/11/2005		Monitor motor bearings for increased vibration
		Motocompresor	No registra fallas
Agua de enfriamiento	29/01/2009	Motobomba 1	Monitor all motor bearings for increased vibration
	13/02/2008		Monitor all motor bearings for increased vibration
	10/04/2006		Monitor all motor bearings for increased vibration
	15/11/2005		Monitor all motor bearings for increased vibration
		Motobomba de refuerzo 1	No registra fallas
	29/01/2009	Motobomba 2	Monitor motor drive end bearing for increased vibration
	13/02/2008		Monitor motor drive end bearing for increased vibration
			No registra fallas
		Motobomba de	No registra fallas

		refuerzo 2	
Alta presión	29/01/2009		Monitor motor for increased vibration and perform electrical checks
	08/08/2008		Monitor motor for increased vibration and perform electrical checks
	25/03/2007		Overhaul motor.
	17/11/2005		Monitor motor for increased vibration and perform electrical checks
Frenos y gatos			No registra fallas
Ventilación	10/05/2006	Ventilador B	Monitor motor bearings for increased vibration
		Ventilador C	No registra fallas
Excitación	30/01/2009	Ventilador E42	Inspect fan wheel; repair or replace fan wheel
	30/01/2009	Ventilador E43	Inspect fan wheel; repair or replace fan wheel
Transformador			No registra fallas
Hidrogenador			No registra fallas

Total de fallas: 21

TABLA XXIII. REGISTRO DE FALLAS DETECTADAS POR EL ANALIZADOR DE VIBRACIONES EN LA UNIDAD

Sistema	Fecha	Equipo	Falla
Acumulación y bombeo	2006-2009		No registra fallas
Agua de enfriamiento	03/06/2008	Motobomba 1	Balance motor
	21/06/2007		Monitor motor for increased vibration
	27/12/2006		Monitor motor for increased vibration
	10/04/2006		Monitor motor for increased vibration
	04/12/2009	Motobomba 2	Check motor mounting and foundation integrity
	03/06/2008		Replace motor drive end bearing
	21/06/2007		Monitor all motor bearings for increased vibration
	22/03/2007		Replace motor drive end bearing
	27/12/2006		Replace motor drive end bearing
		Motocompresor	No registra fallas
Alta presión		Motobomba CA	No registra fallas
		Motobomba CC	No registra fallas
Ventilación	10/05/2006	Ventilador B	Monitor fan bearings for increased vibration
	03/05/2009	Ventilador C	Monitor motor for increased vibration
	09/05/2008		Monitor motor for increased vibration
Excitación	03/11/2009	Ventilador inferior	Clean and inspect fan rotor and balance if necessary

	09/06/2008	Ventilador superior	Check motor mounting and foundation integrity
Transformador principal			No registra fallas
Hidrogenerador	03/06/2008		Monitor turbine bearings for increased vibration
	10/08/2006		Replace turbine bearings.
			Inspect generator thrust bearing for wear

Total de fallas: 15

TABLA XXIV. REGISTRO DE FALLAS DETECTADAS POR EL ANALIZADOR DE VIBRACIONES EN LA UNIDAD

Sistema	Fecha	Equipo	Falla
Acumulación y bombeo		Motobomba 1	No registra fallas
		Motobomba 2	No registra fallas

	14/11/2005	Motocompresor	Monitor motor bearings for increased vibration
Agua de enfriamiento	04/07/2007	Motobomba 1	Monitor motor for increased vibration
	15/11/2005		Overhaul motor
	10/05/2008	Motobomba 2	Replace motor drive end bearing
	27/07/2008		Monitor motor for increased vibration
	07/04/2008		Replace motor drive end bearing
			Replace motor drive end bearing
	24/12/2007		Monitor all motor bearings for increased vibration
	07/04/2007		Replace motor drive end bearing
Sistema de alta presión		Bomba de CA	No registra fallas
		Bomba de CC	No registra fallas
Ventilación	18/12/2008	Ventilador B	Replace fan drive end bearing
			Check belt for wear and incorrect tension
	26/03/2007		Monitor fan bearings for increased vibration
	10/05/2006		Monitor motor bearings for increased vibration
		Ventilador C	No registra fallas
Excitación	20/12/2008	Ventilador Inferior	Clean and inspect fan rotor and balance if necessary
	07/05/2008		Check belt for wear and incorrect tension
	20/12/2008	Ventilador Superior	Clean and inspect fan rotor and balance if necessary
			Monitor fan bearings for increased vibration
	07/05/2008		Monitor fan bearings for increased vibration
Transformador			No registra fallas

Hidrogenador	9/10/2006		Check turbine rotor for improper clearances and nozzle wear
--------------	-----------	--	---

Total de fallas: 19

TABLA XXV. REGISTRO DE FALLAS DETECTADAS POR EL ANALIZADOR DE VIBRACIONES EN LA UNIDAD

8

Sistema	Fecha	Equipo	Falla
Acumulación y bombeo		Motobomba 1	No registra fallas
		Motobomba 1	No registra fallas
	28/08/2008	Motocompresor	Replace motor bearings
Agua de enfriamiento	06/06/2008	Motobomba 1	Balance motor
	23/12/2008		Monitor motor for increased vibration
	25/02/2009	Motobomba 2	Replace motor bearings
	03/12/2008		Monitor all motor bearings for increased vibration
	03/01/2007		Replace motor bearings
	16/11/2005		Monitor motor for increased vibration

Alta presión	25/02/2009	Motobomba CA	Check assembly for improper fit and alignment
	12/03/2008		Check assembly for improper fit and alignment
	03/01/2007		Check assembly for improper fit and alignment
	10/05/2006		Check assembly for improper fit and alignment
	20/11/2005		Check assembly for improper fit and alignment
		Motobomba CC	No registra fallas
Ventilación		Ventilador B	No registra fallas
		Ventilador C	No registra fallas
	28/08/2008		Monitor fan bearings for increased vibration
	03/01/2007		Monitor fan bearings for increased vibration
	10/05/2006		Monitor fan bearings for increased vibration
Excitación	28/08/2008	Ventilador Inferior	Clean and inspect fan rotor and balance if necessary
	28/02/2008		Clean and inspect fan rotor and balance if necessary
	28/02/2009	Ventilador superior	Check driven sheave for runout and eccentricity
	29/08/2008		Clean and inspect fan rotor and balance if necessary
			Check driven sheave for runout and eccentricity
Transformador	14/10/2006		Clean and inspect fan rotor and balance if necessary
			Check driven sheave for runout and eccentricity
Hidrogenerador			No registra fallas

Total de fallas: 22

TABLA XXVI. REGISTRO DE FALLAS DETECTADAS POR EL ANALIZADOR DE VIBRACIONES EN LA UNIDAD

9

Sistema	Fecha	Equipo	Falla
Acumulación y bombeo		Motobomba 1	No registra fallas
		Motobomba 2	No registra fallas
		Motocompresor	No registra fallas
Agua de enfriamiento	08/06/2008	Motobomba 1	Monitor motor for increased vibration
	25/07/2008	Motobomba 2	Monitor motor for increased vibration
	22/03/2007		Replace motor free end bearing
			Replace motor drive end bearing
	22/10/2006		Check motor mounting and foundation integrity

			Check motor mounting and foundation integrity
	14/11/2005		Monitor motor for increased vibration
			Check motor mounting and foundation integrity
Alta presión			No registra fallas
Ventilación		Ventilador B	No registra fallas
		Ventilador C	No registra fallas
	17/11/2005		Monitor fan bearings for increased vibration
Excitación	01/03/2009	Ventilador inferior	Clean and inspect fan rotor and balance if necessary
	26/07/2008		Clean and inspect fan rotor and balance if necessary
		Ventilador superior	No registra fallas
Transformador			No registra fallas
Hidrogenerador			No registra fallas

Total de fallas: 11

TABLA XXVII. REGISTRO DE FALLAS DETECTADAS POR EL ANALIZADOR DE VIBRACIONES EN LA

UNIDAD 10

Sistema	Fecha	Equipo	Falla
Acumulación y bombeo		Motobomba 1	No registra fallas
		Motobomba 2	No registra fallas
		Motocompresor	No registra fallas
Agua de enfriamiento	31/01/2008	Motobomba 1	Balance motor
	01/06/2009	Motobomba 2	Replace motor free end bearing
	31/01/2008		Replace motor free end bearing
			Replace motor drive end bearing
	23/03/2007		Replace motor free end bearing
			Replace motor drive end bearing
	02/01/2007		Monitor motor drive end bearing for increased vibration
Sistema de alta		Bomba CA	No registra fallas
		Bomba CC	No registra fallas
	26/05/2009		Check assembly for improper fit and alignment
	26/03/2007		Check assembly for improper fit and alignment
	02/01/2007		Check assembly for improper fit and alignment
Ventilación	25/05/2009	Ventilador B	Monitor fan bearings for increased vibration
	30/01/2008		Replace fan bearings

	26/03/2007		Replace fan drive end bearing
	13/10/2006		Replace fan bearings
	10/05/2006		Replace fan drive end bearing
	19/11/2005		Monitor fan bearings for increased vibration
	25/05/2009	Ventilador C	Monitor fan bearings for increased vibration
Excitación	30/05/2009	Ventilador Inferior	Monitor fan bearings for increased vibration
		Ventilador Superior	No registra fallas
Transformador			No registra fallas
Hidrogenerador	16/12/2008		Overhaul turbine.
	13/10/2006		Inspect generator thrust bearing for wear
			Monitor turbine bearings for increased vibration

Total de fallas: 21.

3.2.1. Resultados del comportamiento vibracional mediante el analizador de vibraciones de marca

DLI, modelo DCX-XRT.

Según el comportamiento vibracional determinado mediante el equipo analizador, se puede observar el número de fallas que ocurrieron desde el año 2006 hasta el año 2009, tal como se manifiesta en la siguiente tabla:

TABLA XXVIII. COMPORTAMIENTO DE LAS UNIDADES DE GENERACIÓN DESDE EL AÑO 2006 HASTA EL 2009

UNIDAD	Unidad 1	Unidad 2	Unidad 3	Unidad 4	Unidad 5	Unidad 6	Unidad 7	Unidad 8	Unidad 9	Unidad 10
Fallas	26	22	28	25	21	15	19	22	11	21

Lo que se puede verificar en la siguiente representación gráfica.

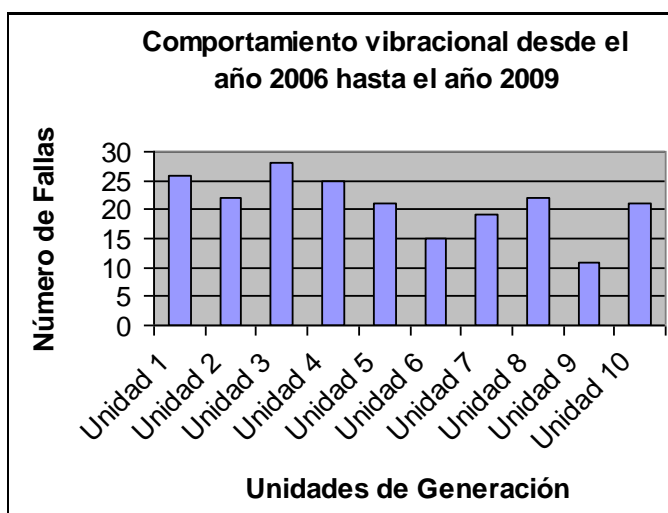


Figura 25. Comportamiento vibracional determinado por el analizador DLI

Lo que determina que las unidades afectadas por fallas por la fase AB es la unidad 3 y por la fase C es la unidad 8.

3.3. Comportamiento vibracional de las unidades de generación desde el año 2001 hasta el año 2009.

Para seleccionar la unidad más afectada por fallas, durante 9 años de funcionamiento, se analizó los registros de fallas desde el 2001 hasta el 2005 con el equipo medidor de impulsos de choque (SPM) y para los años desde el 2006 hasta el 2009, se utilizó los registros del equipo analizador de vibraciones DLI, obteniendo los siguientes resultados:

TABLA XXIX. COMPORTAMIENTO DE LAS UNIDADES DE GENERACIÓN DESDE EL AÑO 2001 HASTA EL AÑO 2009

UNIDAD	Unidad 1	Unidad 2	Unidad 3	Unidad 4	Unidad 5	Unidad 6	Unidad 7	Unidad 8	Unidad 9	Unidad 10
Fallas Totales	83	65	78	58	70	67	71	67	65	82

Estos resultados se pueden evidenciar mediante la siguiente gráfica.

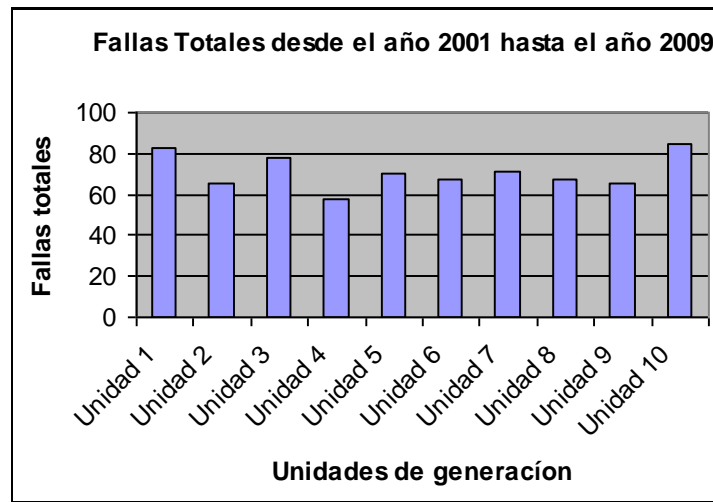


Figura 26. Comportamiento vibracional determinado por los medidores SPM y DCX.

De esta manera se seleccionó para este análisis la unidad 1, ya es la unidad que registra más fallas y tiene más años de funcionamiento.

3.4. Categorización de máquinas según las normas ISO 2372, VDI 2056, y BS 4675, para el control de vibraciones [11].

TABLA XXX. CRITERIO DE SEVERIDAD DE LAS VIBRACIONES ACORDE CON
LAS NORMAS ISO 2372, VDI 2056 Y BS 4675

45.00	No Permisible	No Permisible	No Permisible	No Permisible
28.00				Límite
18.00				
11.20				Límite
7.10				
4.50	Límite	Límite	Admisible	Admisible
2.80				
1.80		Admisible		Normal
1.12	Admisible			
0.71	Normal			
0.45				
0.28				
0.18				
- Vel. [mm/s]	Máquinas Pequeñas (15 kW)	Máquinas Medianas (15-75 kW) (300 kW, soporte especial)	Máquinas grandes (base rígida) (75 kW)	Máquinas grandes (alta velocidad) (75 kW)

3.5. Carta DLI: Guía de severidad de vibraciones en la maquinaria [12].

TABLA XXXI. GUÍA DE SEVERIDAD DLI

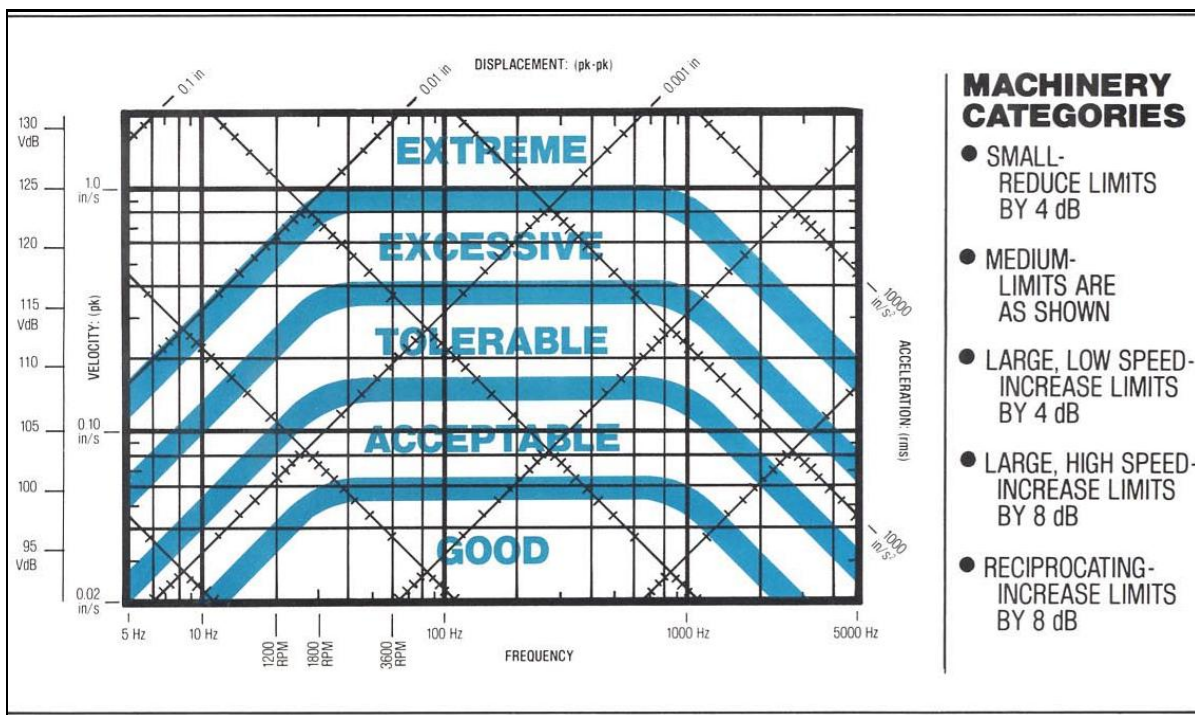


TABLA XXXII. RELACIONES Y CONVERSIÓN DE UNIDADES

D = Displacement in (pk-pk)	$D = .318 \frac{V}{f} = .0716 \frac{A}{f^2}$	dB	RATIO
V = Velocity in/s (pk)		1	1.12
A = Acceleration in/s ² (rms)	$V = .225 \frac{A}{f} = 3.14 f D$	2	1.26
f = Frequency Hz		3	1.41
g = Gravity = 386 in/s ²	$A = 14.0 f^2 D = 4.44 f V$	4	1.58
		5	1.78
		6	1.99
		7	2.24
		8	2.50
		9	2.82
VELOCITY DECIBELS	ACCELERATION DECIBELS	10	3.16
Ref: 0 VdB = 5.568×10^{-7} in/s (pk)	Ref: 0 AdB = 3.861×10^{-4} in/s ² (rms)	15	5.63
VdB = $20 \log_{10} \left(\frac{V \times 10^7}{5.568} \right)$	AdB = $20 \log_{10} \left(\frac{A \times 10^4}{3.861} \right)$	20	10.00
V(pk) = $5.568 \times 10^{(VdB-140)/20}$	A (rms) = $3.861 \times 10^{(AdB-80)/20}$	40	100.00

TABLA XXXIII. CONVERSIÓN DE VdB A mm/s

V d b	L = m m / s	V d b	L = m m / s	V d b	L = m m / s
126	20	108	2,51	90	0,316
125	17,8	107	2,24	89	0,282
124	15,9	106	2	88	0,251
123	14,1	105	1,78	87	0,224
122	12,6	104	1,59	86	0,2
121	11,2	103	1,41	85	0,178
120	10	102	1,26	84	0,159
119	8,92	101	1,12	83	0,141
118	7,95	100	1	82	0,126
117	7,08	99	0,892	81	0,112
116	6,31	98	0,795	80	0,1
115	5,63	97	0,708	79	0,089
114	5,02	96	0,631	78	0,079
113	4,47	95	0,563	77	0,07
112	3,98	94	0,502	76	0,063
111	3,55	93	0,447	75	0,056
110	3,16	92	0,398	74	0,05
109	2,82	91	0,355	73	0,026

3.7. Categorización de equipos rotativos de la unidad 1.

TABLA XXXIV. CATEGORIZACIÓN DE EQUIPOS ROTATIVOS SEGÚN LA ISO 2372, VDI 2056, Y BS 4675

SISTEMA	Máquina /Equipo	Potencia en Kw	Parámetro recomendado de buen funcionamiento	Clasificación según ISO 2372, VDI 2056, y BS 4675
Hidrogenerador	Turbina- Generador	116000	Menor a 108.9 VdB = 1,8 mm/s Puede llegar hasta 113.1 VdB = 2,8 mm/s	Máquina grande de baja velocidad
Transformador	Motobomba 1	2.75	Menor a 101 VdB = 1.12 mm/s	Máquina pequeña
	Motobomba 2	2.75	Puede llegar hasta 105.1 VdB = 1,8 mm/s	
Regulación	Motobomba 1	20.5	Menor a 105.1 VdB = 1.8 mm/s	Máquina mediana
	Motobomba 2	20.5	Puede llegar hasta a 113.1 VdB = 2,8 mm/s	
	Motocompresor	4.6	Menor a 101 VdB = 1.12	Máquina pequeña

			m m /s Puede llegar hasta 105.1 V d B = 1,8 m m /s	
A g u a d e e n f r i a m i e n t o	M o t o b o m b a 1	55.92	M e n o r a 105.1 V d B = 1.8 m m /s	M á q u i n a m e d i a n a
	M o t o b o m b a 2	55.92	Puede llegar hasta a 113.1 V d B = 2,8 m m /s	
	M o t o b o m b a d e r e f u e r z o 1	5.59	M e n o r a 101 V d B = 1.12 m m /s	M á q u i n a p e q u e ñ a
	M o t o b o m b a d e r e f u e r z o 2	5.59	Puede llegar hasta 105.1 V d B = 1,8 m m /s	
V e n t i l a c i ó n	V e n t i l a d o r B	4	M e n o r a 101 V d B = 1.12 m m /s	M á q u i n a p e q u e ñ a
	V e n t i l a d o r C	2.2	Puede llegar hasta 105.1 V d B = 1,8 m m /s	M á q u i n a p e q u e ñ a
E x c i t a c i ó n	V e n t i l a d o r s u p e r i o r	1.2	M e n o r a 101 V d B = 1.12 m m /s	M á q u i n a p e q u e ñ a
	V e n t i l a d o r i n f e r i o r	1.2	Puede llegar hasta 105.1 V d B = 1,8 m m /s	M á q u i n a p e q u e ñ a
A l t a p r e s i ó n	M o t o b o m b a	17.3	M e n o r a 105.1 V d B = 1.8 m m /s Puede llegar hasta a 113.1 V d B = 2,8 m m /s	M á q u i n a m e d i a n a

Frenos y gatos	Motobomba	3	Menor a 101 VdB = 1.12 mm/s Puede llegar hasta 105.1 VdB = 2,8 mm/s	Máquina pequeña
-----------------------	------------------	---	---	----------------------------

CAPÍTULO IV

4. ANÁLISIS DE VIBRACIONES DE FALLAS DETECTADAS EN LA UNIDAD 1

Existen algunos equipos que no tienen un registro de fallos durante el periodo de monitoreo mediante la medición de vibraciones, mientras que otros equipos mantienen registros de fallos que son muy frecuentes. Los datos analizados son desde el año 2006 hasta el año 2009.

Para el diagnóstico de fallas se utiliza los parámetros técnicos que se indican en el ANEXO 2.

4.1. Comportamiento vibracional del sistema de hidrogenación.

El hidrogenador ha mostrado una estabilidad vibracional, lo que se confirma al ser monitoreado con el equipo analizador de vibraciones DLI, modelo DCX-XRT, cuyo registro de medidas de vibraciones es el siguiente:

Fecha	Estado técnico
06-10-2006	Bueno
12-10-2006	Bueno

22-03-2007	Bueno
17-05-2007	Bueno
01-11-2007	Bueno
15-10-2008	Bueno
11-04-2009	Bueno

4.2. Comportamiento vibracional del Sistema del transformador principal.

Desde el año 2001 hasta el año 2007, para las 2 motobombas del transformador, se ha utilizado el equipo medidor de impulsos de choque (SPM), mostrando un comportamiento normal, de igual forma al utilizar el equipo analizador de vibraciones han mantenido el comportamiento con cierta estabilidad, manteniéndose dentro los parámetros de vibración establecidos como de buen estado técnico.

Las medidas que se han tomado con el equipo analizador de vibraciones tanto para la motobomba 1 como para la motobomba 2, han registrado una estabilidad, cuyo registro de medidas de vibraciones es el siguiente:

Fecha	Estado técnico
15-10-2008	Bueno

11-04-2009

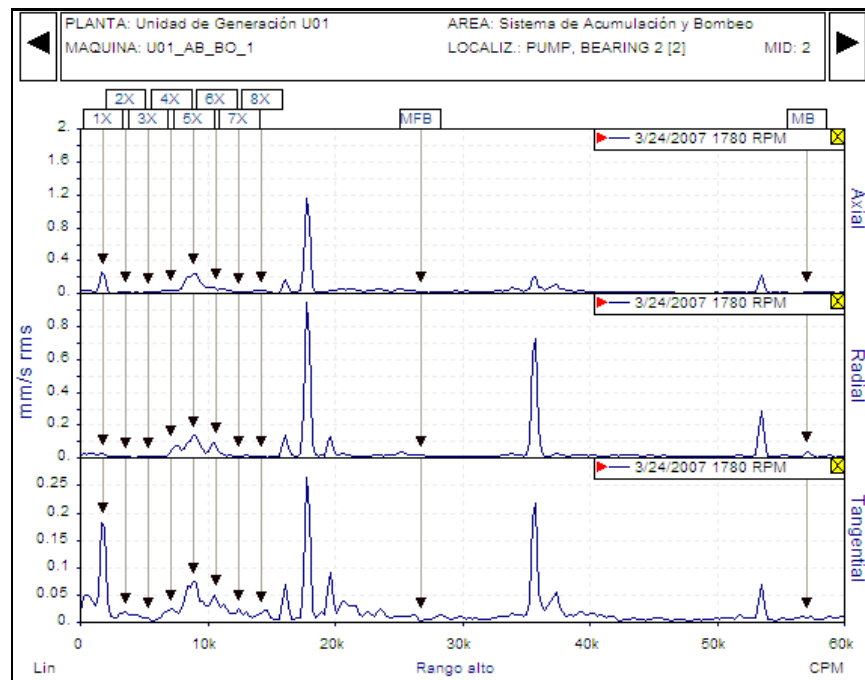
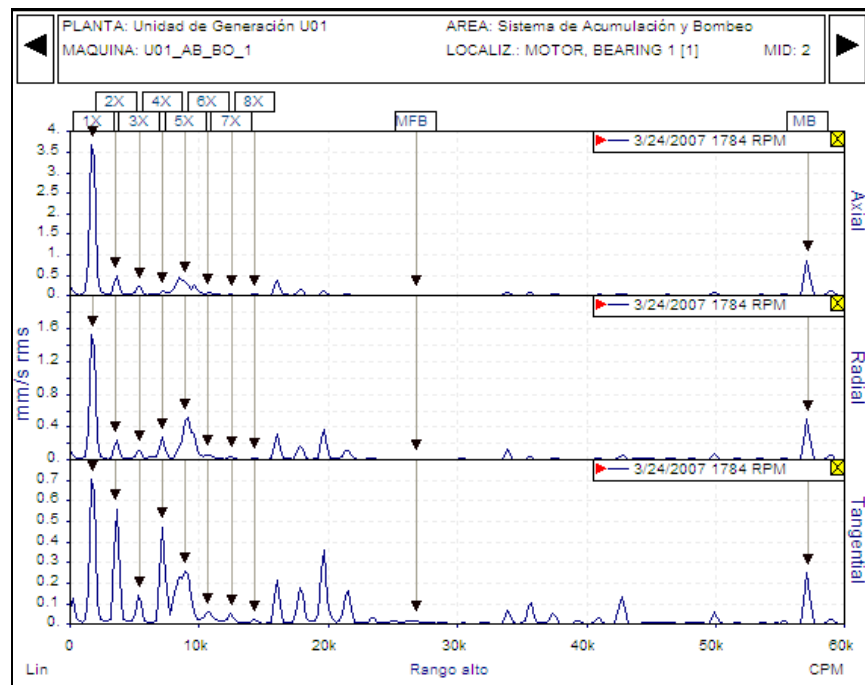
Bueno

4.3. Diagnóstico del sistema de acumulación y bombeo.

Este sistema presenta fallas en la motobomba 1, al ser monitoreado con el equipo analizador de vibraciones, mientras que la motobomba 2 no manifiesta fallos. A continuación se destacan los problemas de la motobomba 1 y luego el registro de mediciones de la motobomba 2.

4.3.1. Motobomba 1.

- Medición realizada el 24/3/2007.



Frecuencia de excitación: 1 X.

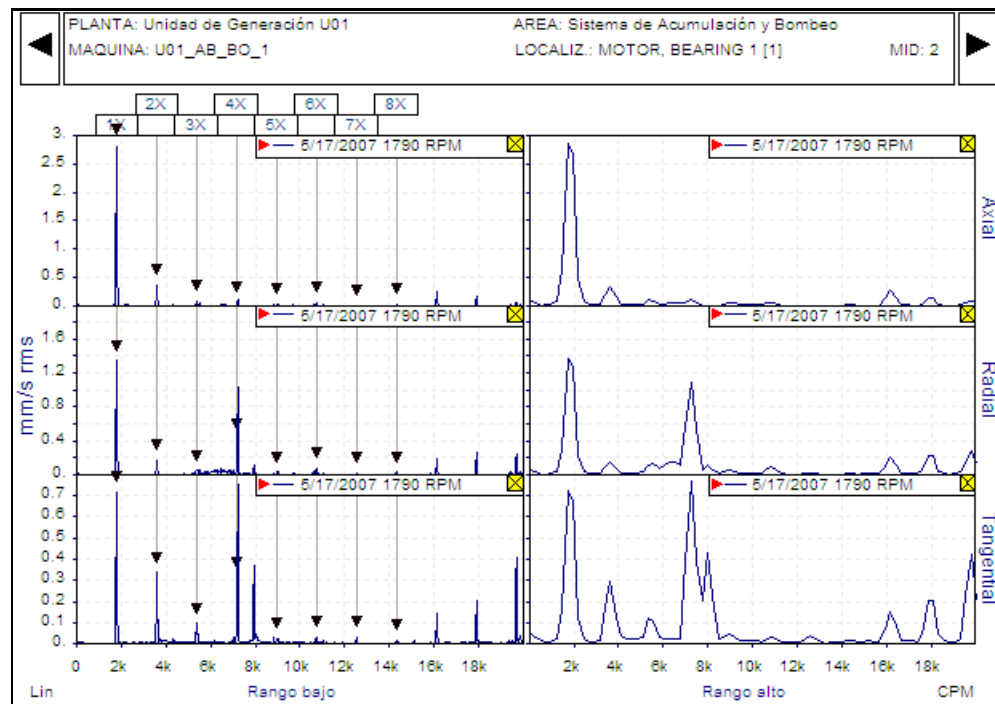
Plano dominante: Axial en el punto 1 y radial en el punto 2.

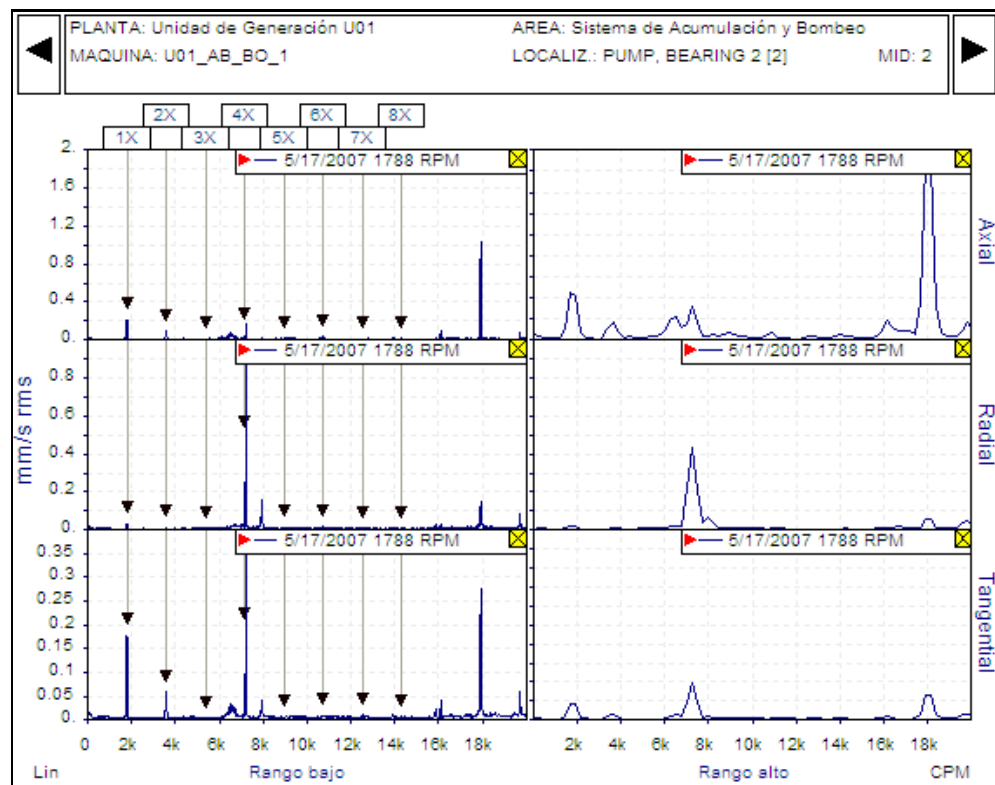
Problema: Deslizamiento del conjunto eje-rodamiento sobre el alojamiento en el punto 1 y falla del rodamiento en el punto 2, que se manifiesta en la frecuencia de 10.03 X en la dirección radial, presentando armónicos en alto rango.

Recomendación: Verificar el desgaste del alojamiento del rodamiento. Analizar el comportamiento del rodamiento en el punto 2 en las próximas mediciones de vibraciones, de tal forma que según la magnitud de las mismas se determine su cambio o no.

Valor relevante: 3,54 mm/s = 111 VdB en 1A.

- Medición realizada el 5/17/2007.





Frecuencia de excitación: 1 X.

Plano dominante: Axial.

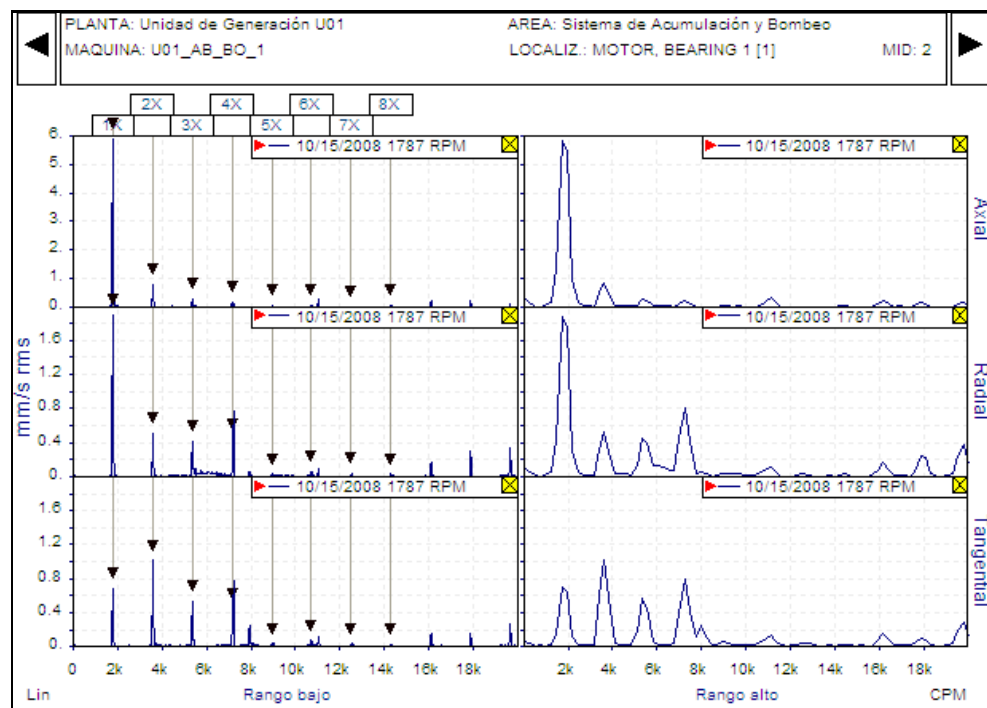
Problema: Deslizamiento del conjunto eje-rodamiento sobre el alojamiento en el punto 1.

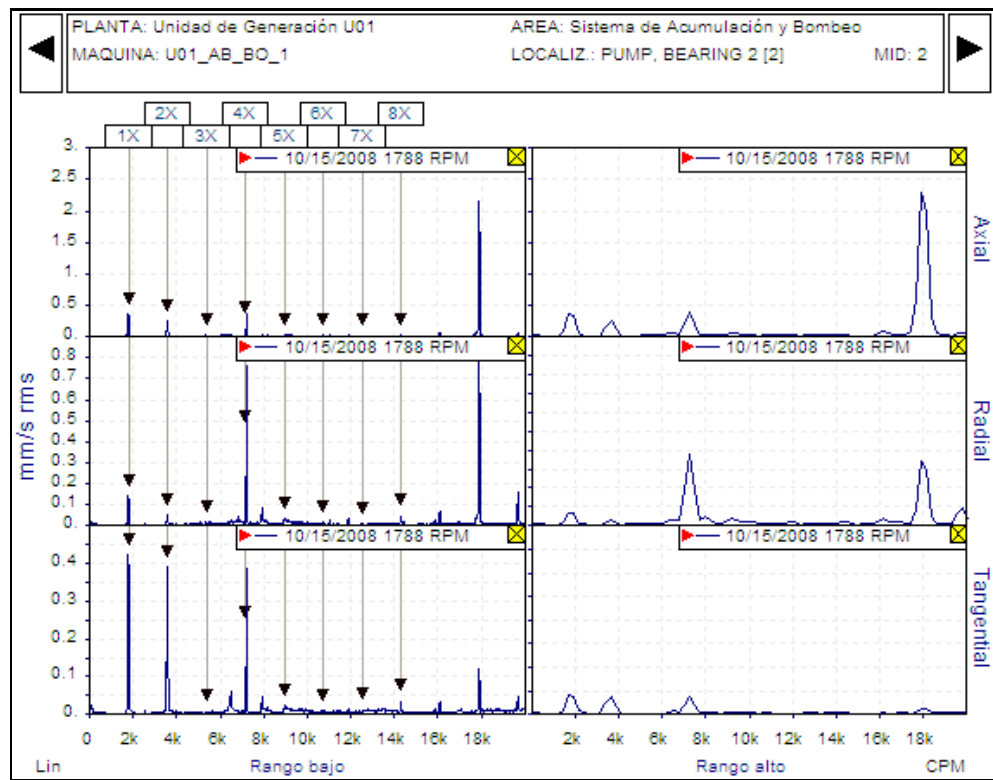
Recomendación: Verificar el desgaste del alojamiento del rodamiento, si existe gran desgaste se

puede utilizar la técnica de graneteado para ajustar el rodamiento a su alojamiento.

Valor relevante: $2,82 \text{ mm/s} = 109 \text{ (-2.4) VdB en 1A}$.

- Medición realizada el 15/10/2008.





Frecuencia de excitación: 1 X.

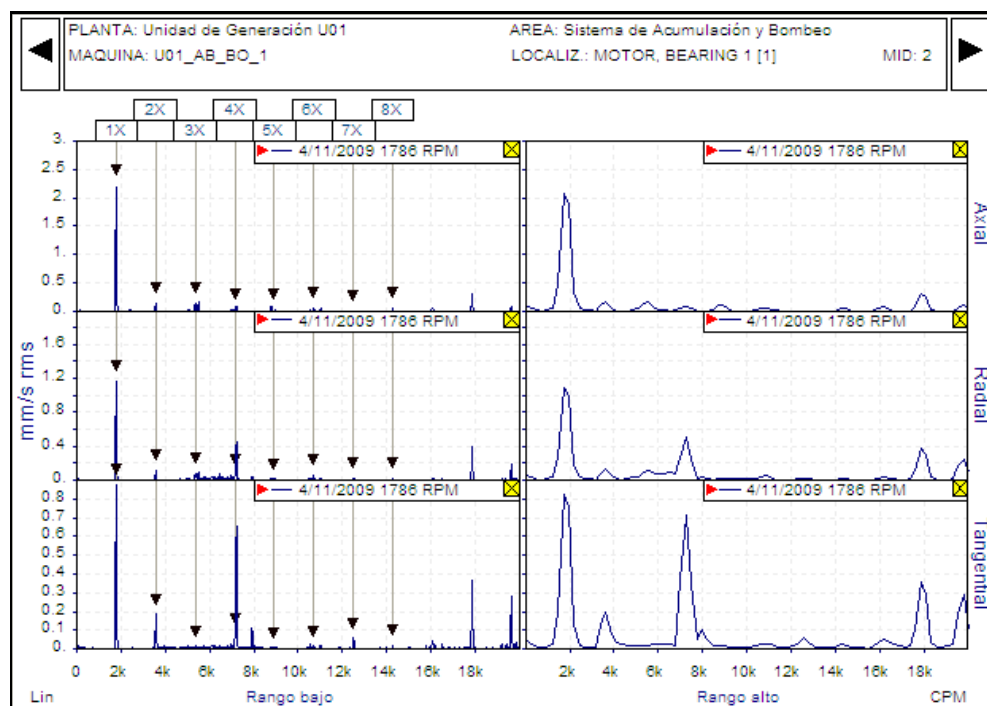
Plano dominante: Axial.

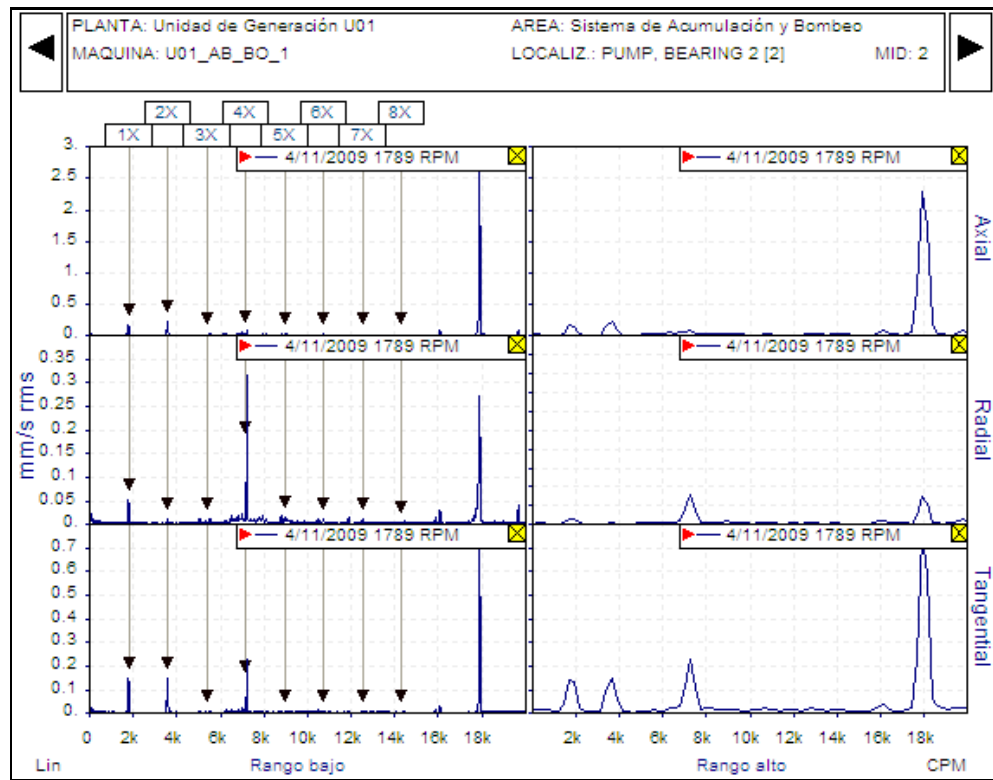
Problema: Deslizamiento del conjunto eje-rodamiento sobre el alojamiento en el punto 1, en esta ocasión es más fuerte que la medida anterior, pasando considerablemente los límites admisibles de vibraciones.

Recomendación: Verificar la magnitud de desgaste del alojamiento del rodamiento, se sugiere utilizar la técnica de graneteado para ajustar el rodamiento a su alojamiento o cambiar la tapa del motor en el punto 1.

Valor relevante: $5,8 \text{ mm/s} = 115,3 (+3,9) \text{ VdB en 1A.}$

- Medición realizada el 11/04/2009.





Frecuencia de excitación: 1 X.

Plano dominante: Axial.

Problema: Se mantiene el deslizamiento del conjunto eje-rodamiento sobre el alojamiento en el punto 1. Este efecto a medida que pasa el tiempo por el esfuerzo axial va a provocar una holgura entre el eje y rodamiento.

Recomendación: Verificar el desgaste del alojamiento del rodamiento, si existe gran desgaste se puede utilizar la técnica de graneteado para ajustar el rodamiento a su alojamiento.

Valor relevante: 2,24 mm/s = 107 VdB en 1A.

4.3.2. Motobomba 2,

El comportamiento es normal y no se han registrado fallas, el registro de medidas de vibraciones es el siguiente:

Fecha	Estado técnico
23-10-2006	Bueno
22-03-2007	Bueno
17-05-2007	Bueno
31-10-2007	Bueno
15-10-2008	Bueno
04-11-2009	Bueno

4.3.3. Motocompresor.

Este equipo de igual forma mantiene una estabilidad, cuyo registro de medidas de vibraciones es el siguiente:

Fecha	Estado técnico
04-10-2006	Bueno
24-03-2007	Bueno
17-05-2007	Bueno
31-10-2007	Bueno
15-10-2008	Bueno
11-04-2009	Bueno

4.4. Diagnóstico del sistema de agua de enfriamiento.

4.4.1. Motobomba 1.

Este equipo tiene buena estabilidad en cuanto al comportamiento vibracional, el registro de medidas de vibraciones es el siguiente:

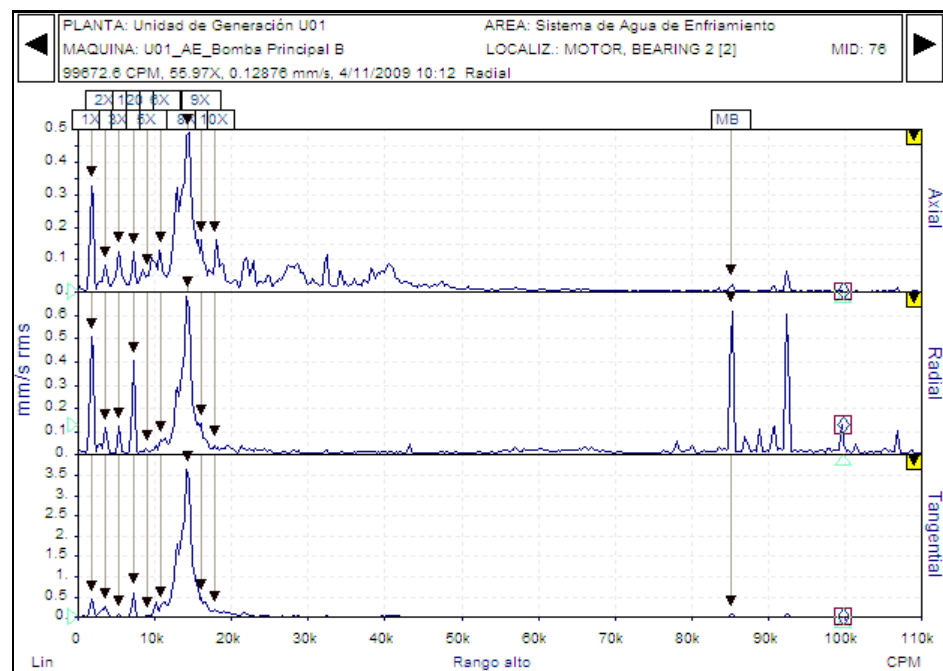
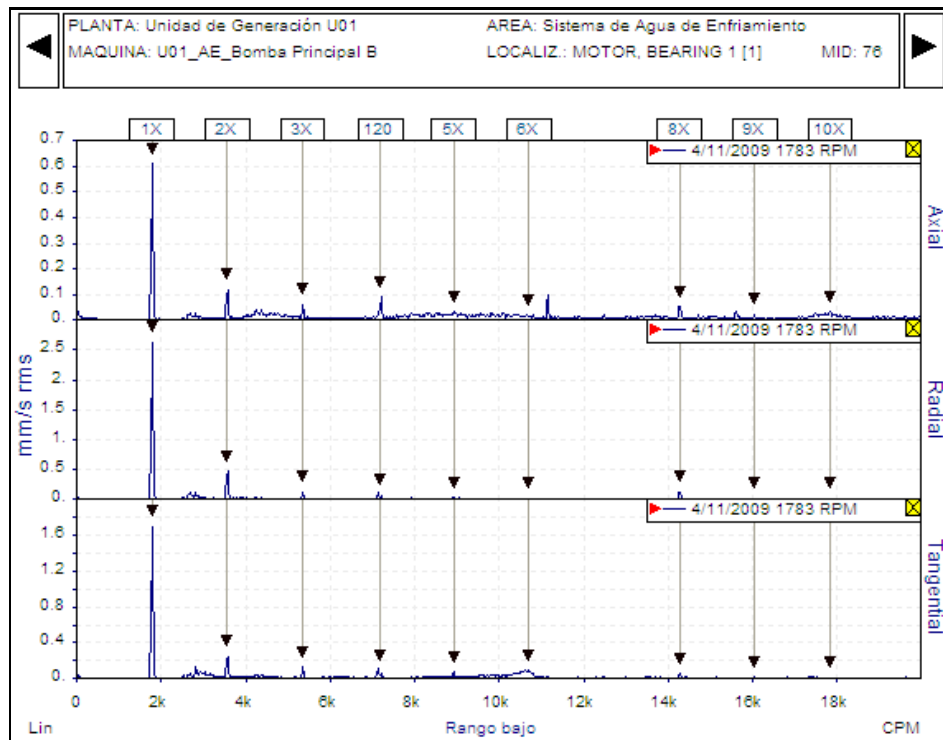
Fecha	Estado técnico
08-03-06	Bueno
07-09-06	Bueno
04-10-06	Bueno
24-03-07	Bueno
17-05-07	Bueno
31-10-07	Bueno
15-10-08	Bueno
11-04-09	Bueno

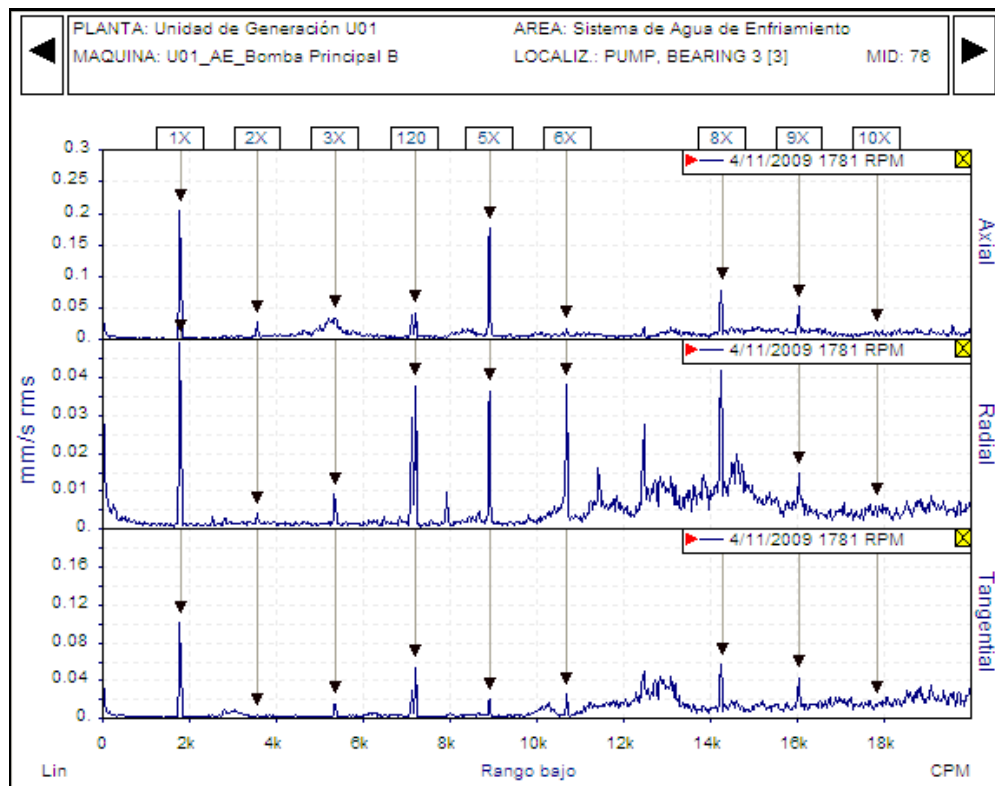
Las bombas de refuerzo en su mayor parte de vida operacional, sus vibraciones han sido medidas con el equipo medidor de impulsos de choque, de igual forma se ha registrado buen estado técnico al utilizar el analizador de vibraciones.

El único problema es en la motobomba 2 el mismo que se muestra a continuación:

4.4.2. Motobomba 2.

- Medición realizada el 11/04/2009.





Frecuencia de excitación: 1X.

Plano dominante: Radial y tangencial.

Problema: Ligero desbalance del motor y falla del rodamiento en el punto 2 manifestándose en 47,8 X en el plano radial, con armónicos en alto rango.

Recomendación: Si en la próxima medición a superado los límites permisibles, balancear según las dimensiones del motor y cambiar el rodamiento si el nivel de vibración aumenta en los picos asíncronos.

Valor relevante: 3,5 mm/s = 110.9 VdB en 2T.

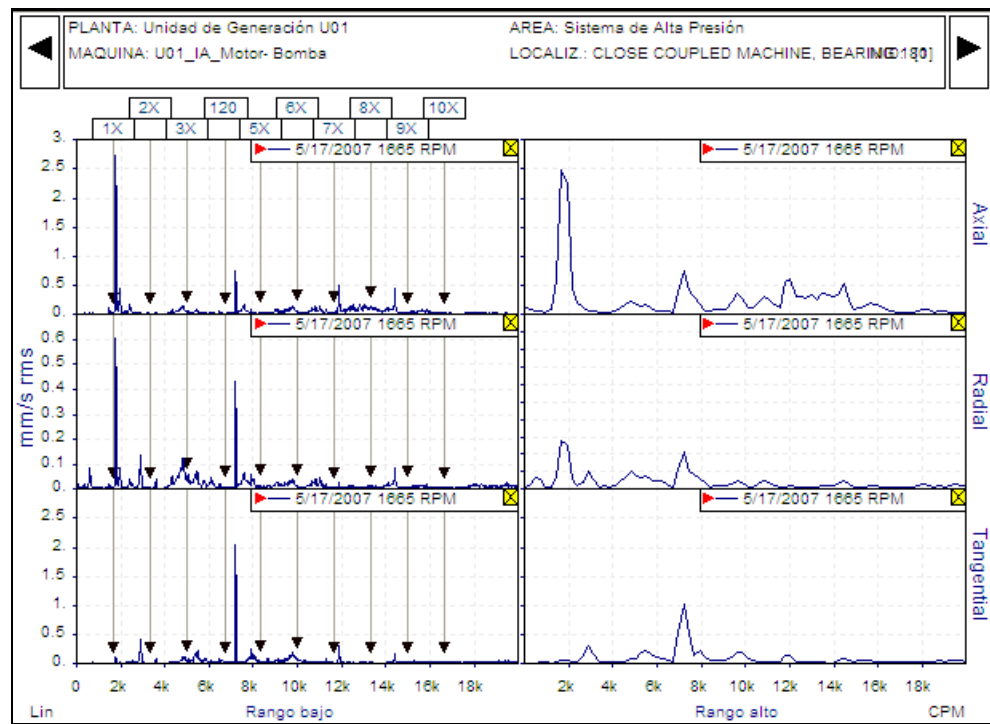
$2,5 \text{ mm/s} = 108 \text{ VdB en 1R.}$

$1,8 \text{ mm/s} = 105,1 \text{ VdB en 1T.}$

4.5. Diagnóstico del sistema de alta presión.

4.5.1. Motobomba.

- Medición realizada el 17/05/2007.



Frecuencia de excitación: 1X.

Plano dominante: Axial.

Problema: Holgura del rodamiento del motor, ajuste inadecuado entre el rodamiento y su

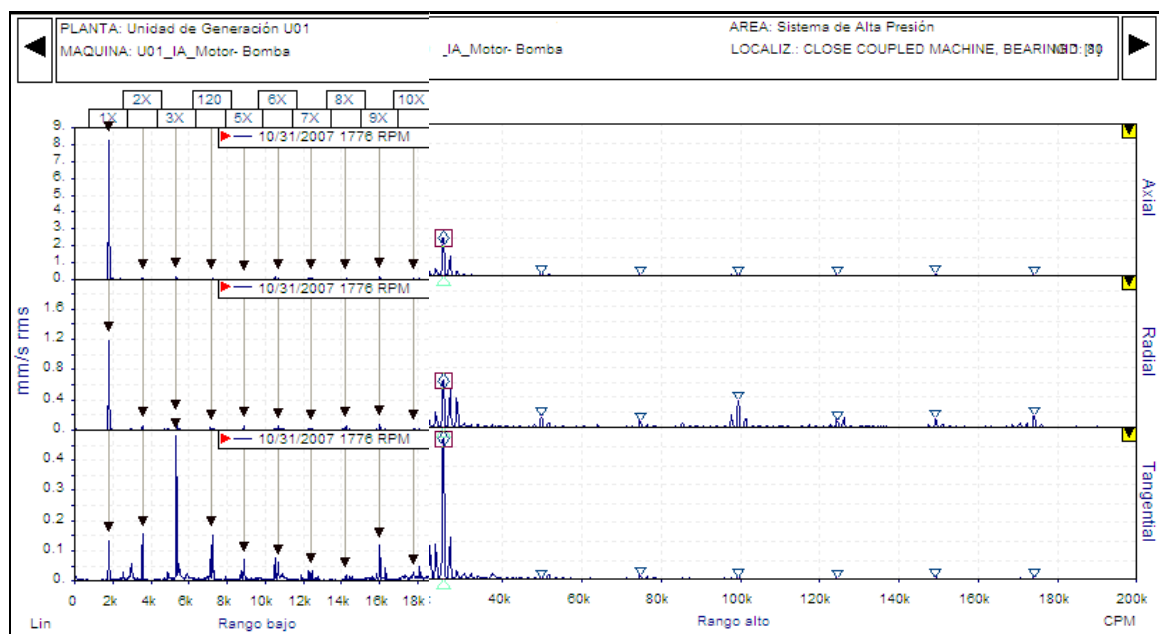
alojamiento.

Recomendación: Verificar el ajuste entre eje rodamiento, el desgaste existente entre el rodamiento y

su alojamiento. Proceder a realizar un ajuste mecánico si las condiciones lo permiten.

Valor relevante: $2,8 \text{ mm/s} = 108,9 \text{ VdB en } 1X \text{ en } 1A$.

- Medición realizada el 31/10/2007.



Frecuencia de excitación: 1X.

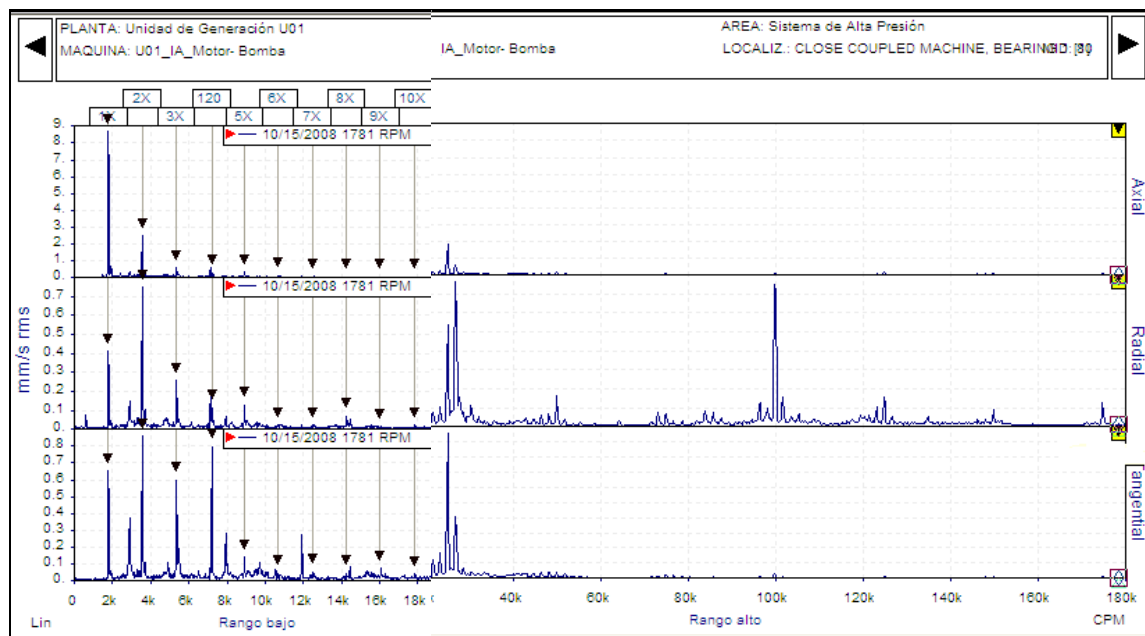
Plano dominante: Axial.

Problema: Deslizamiento del conjunto eje rodamiento sobre su soporte y falla de rodamientos por la presencia de armónicos asíncronos desde 14.1 X en alto rango.

Recomendación: Verificar desgaste en el alojamiento del rodamiento o en la pista exterior del mismo, hacer el seguimiento del comportamiento de los rodamientos, hasta determinar su cambio.

Valor relevante: $8,3 \text{ mm/s} = 118,4 \text{ (-1.6) VdB en 1 X en 1A}$.

- Medición realizada el 15/10/2008.



Frecuencia de excitación: 1X, 2X y 3X.

Plano dominante: Axial y radial.

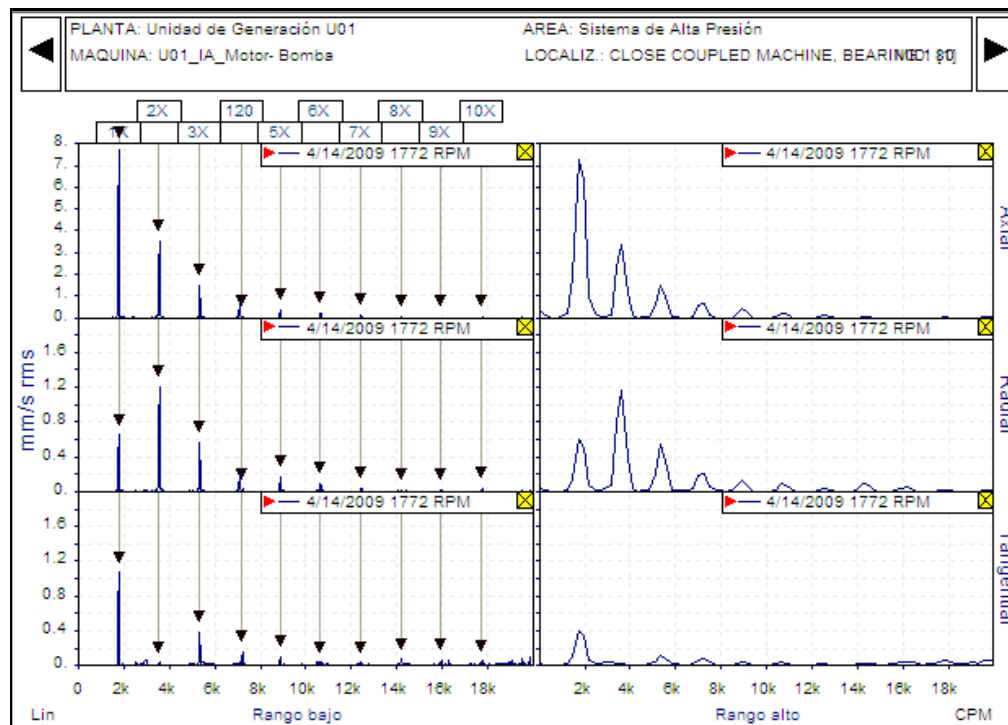
Problema: Desalineación combinada prevaleciendo la desalineación angular, falla de rodamientos con frecuencias de 25.1 X con presencia de armónicos en alto rango, además se verifica holgura del rodamiento en su eje y ligero desbalance de fase eléctrica.

Recomendación: Alineación motor bomba, verificar ajuste del rodamiento y verificar un buen contacto en la conexión eléctrica del motor y monitorear el estado de los rodamientos.

Valores relevantes: 8,92 mm/s = 119 VdB en 1A.

2,82 mm/s = 109 VdB en 1A.

- Medición realizada el 14/04/2009.



Frecuencia de excitación: 1X, 2X y 3X.

Plano dominante: Axial y radial.

Problema: Desalineación combinada prevaleciendo la desalineación angular. **Recomendación:**

Alineación motor bomba

Valores relevantes: 7,95 mm/s = 118 (-1.6) VdB en 1A

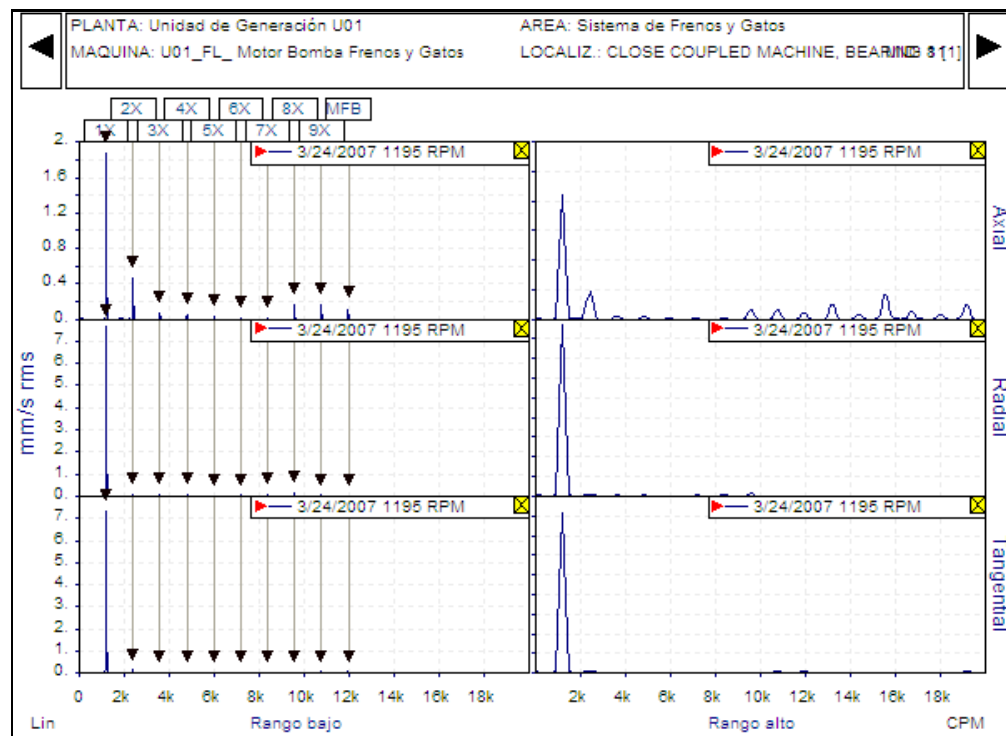
3,55 mm/s = 111 (+29) VdB en 1A

1,26 mm/s = 102 (+25) VdB en 1R

Valores relevantes: $10 \text{ mm/s} = 120 (+11) \text{ VdB en } 1.00x \text{ en } 1T.$

6.1 m m /s = 115.7 (+10) VdB en 1.00x en 1R.

- Medición realizada 24/03/2007.



Frecuencia de excitación: 1X.

Plano dominante: Radial y tangencial.

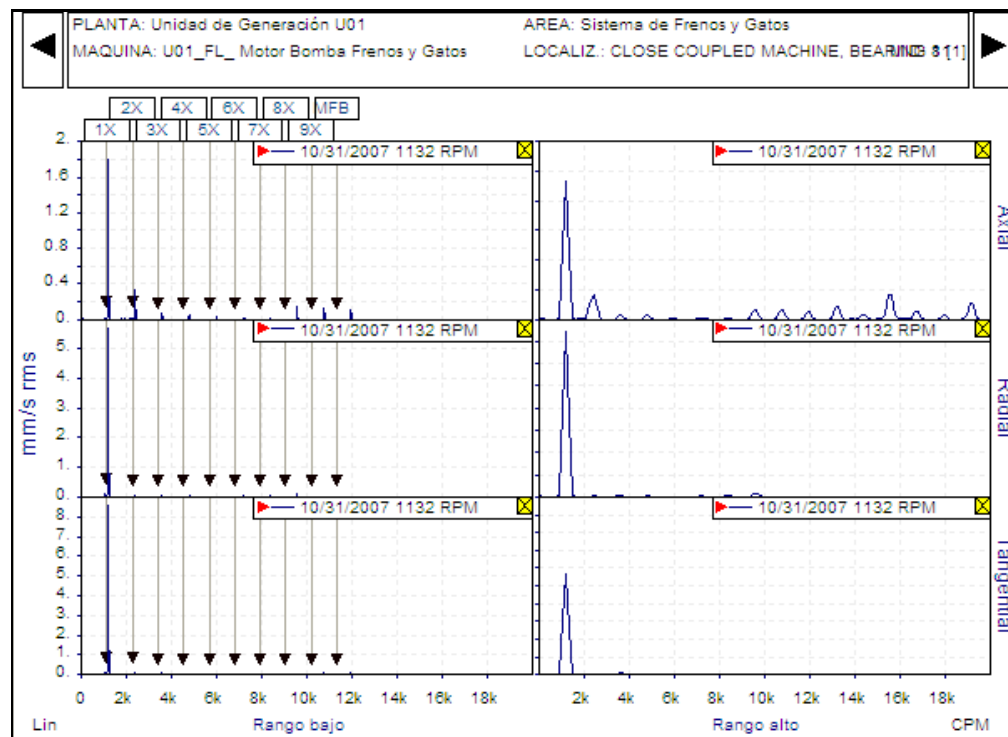
Problema: Desbalance y flexibilidad transversal. Los niveles de vibración han bajado relativamente.

Recomendación: Balancear el equipo según las dimensiones del equipo. Revisar la base del equipo de tal forma para detectar pernos flojos, corrosión, o fisuras en la estructura de montaje.

Valores relevantes: $7,95 \text{ mm/s} = 118 (+11) \text{ VdB en } 1X \text{ en } 1T$.

$7.2 \text{ mm/s} = 117.1 (+10) \text{ VdB en } 1X \text{ en } 1R$.

- Medición realizada el 31/10/2007.



Frecuencia de excitación: 1X.

Plano dominante: Radial y tangencial.

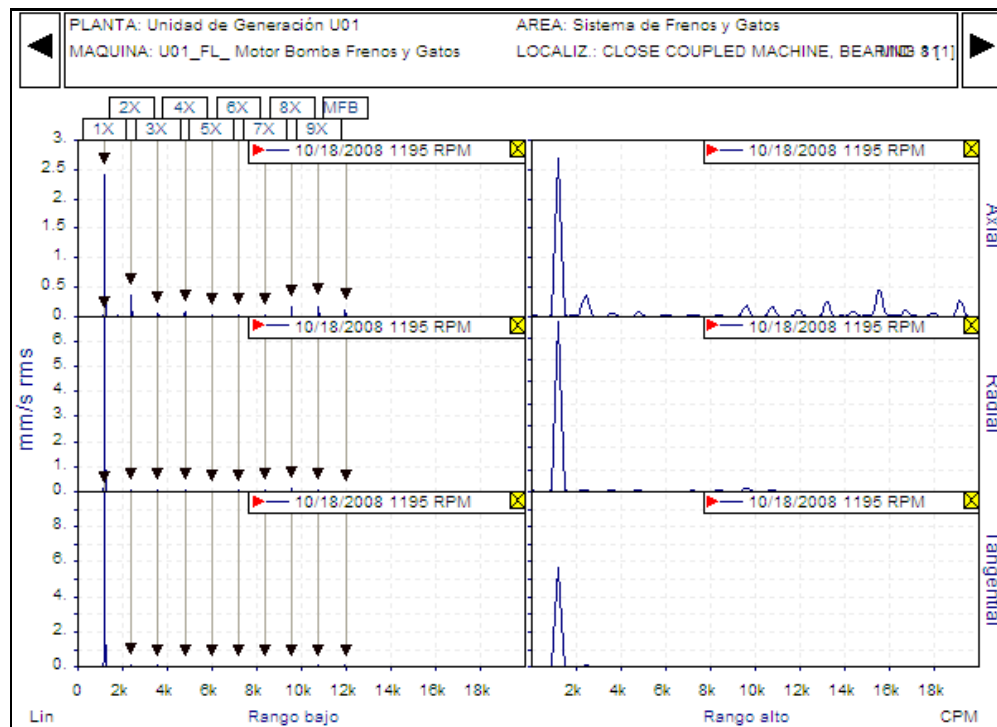
Problema: Desbalance y flexibilidad trasversal.

Recomendación: Balancear el equipo según las dimensiones del equipo. Revisar la base del equipo de tal forma para detectar pernos flojos, corrosión, o fisuras en la estructura de montaje.

Valores relevantes: $8,92 \text{ mm/s} = 119 (+12) \text{ VdB en } 1.00x \text{ en } 1T.$

$5,8 \text{ mm/s} = 115,3 (+9,8) \text{ VdB en } 1.00x \text{ en } 1R.$

- Medición realizada el 18/10/2008.



Frecuencia de excitación: 1X.

Plano dominante: Radial y tangencial.

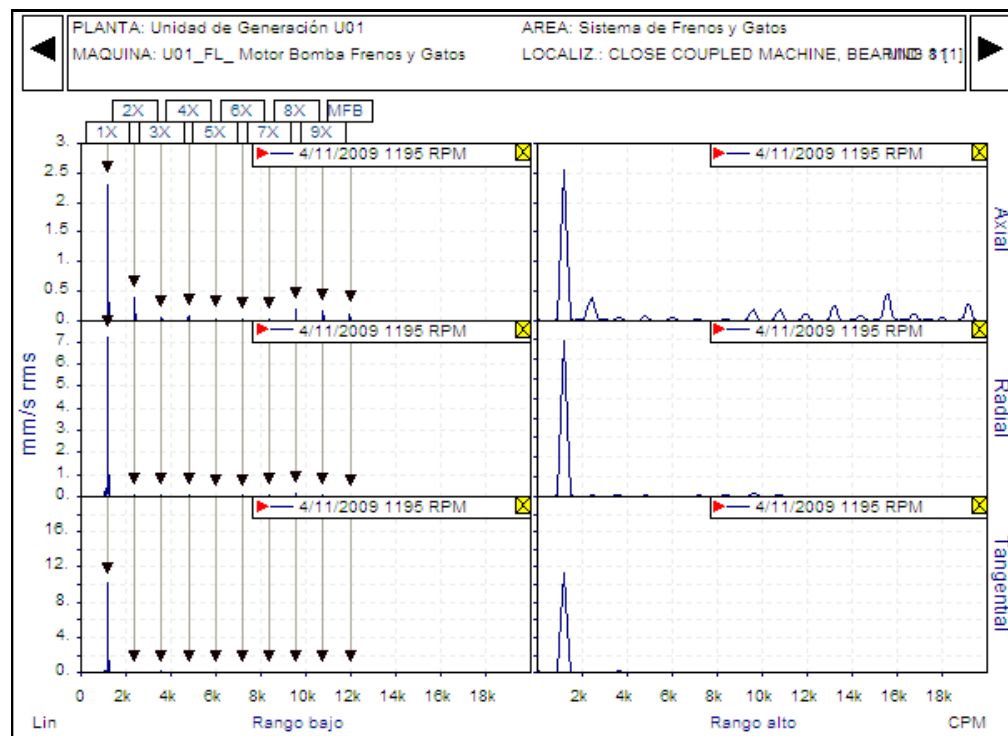
Problema: Desbalance y flexibilidad transversal. Los niveles de vibración vuelven a subir.

Recomendación: Balancear el equipo según las dimensiones del equipo. Revisar la base del equipo de tal forma para detectar pernos flojos, corrosión, o fisuras en la estructura de montaje.

Valores relevantes: $10 \text{ mm/s} = 120 (-0,9) \text{ VdB en 1X en 1T}$.

$7,08 \text{ mm/s} = 117 \text{ VdB en 1.00x en 1R}$.

- Medición realizada el 11/04/2009.



Frecuencia de excitación: 1X.

Plano dominante: Radial y tangencial.

Problema: Desbalance y flexibilidad transversal. Los niveles de vibración siguen subiendo.

Recomendación: Balancear el equipo según las dimensiones del equipo. Revisar la base del equipo de tal forma para detectar pernos flojos, corrosión, o fisuras en la estructura de montaje.

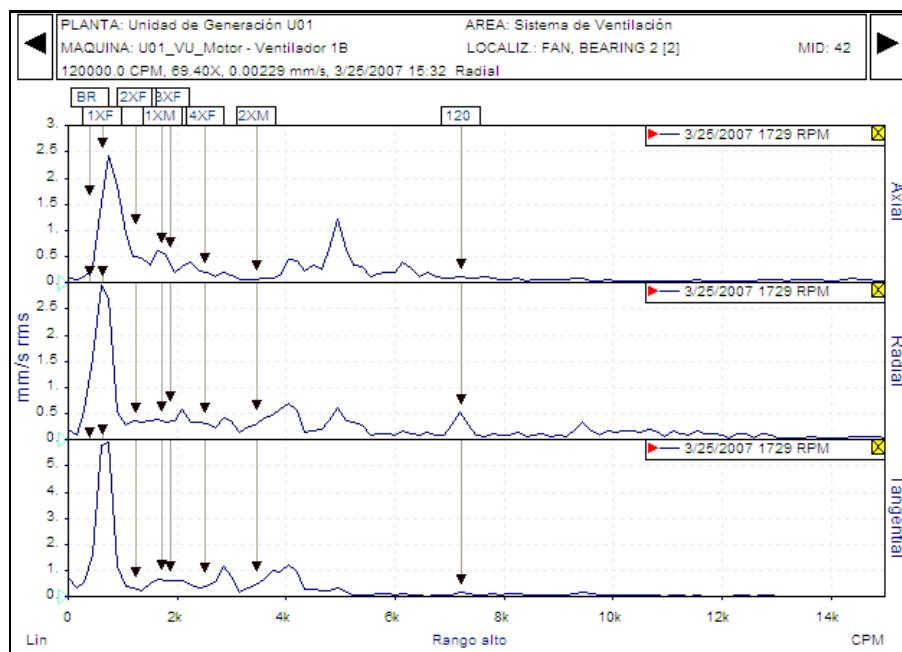
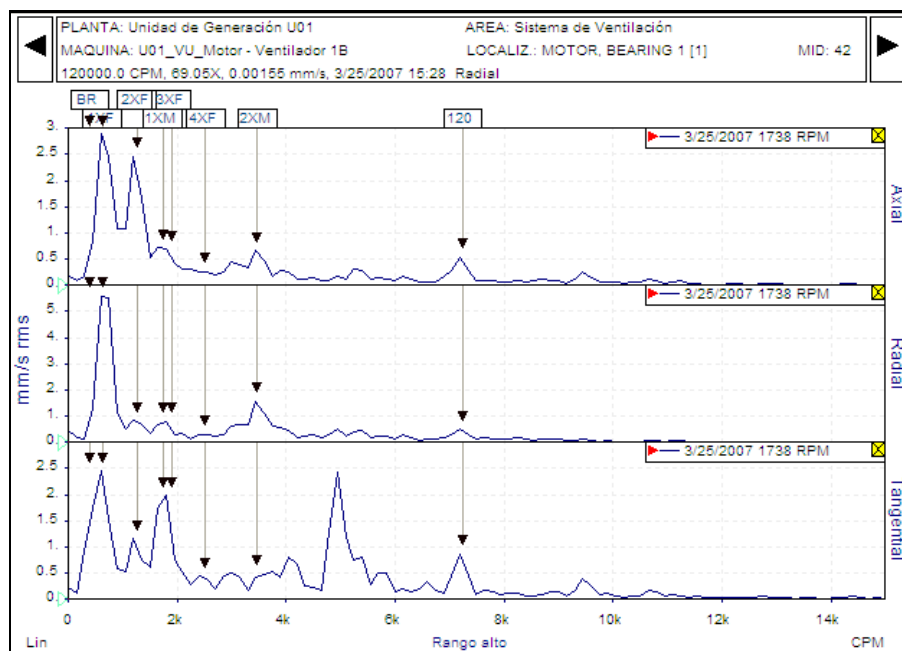
Valor relevante: $10 \text{ mm/s} = 120 (-0,9) \text{ VdB en 1X en 1T.}$

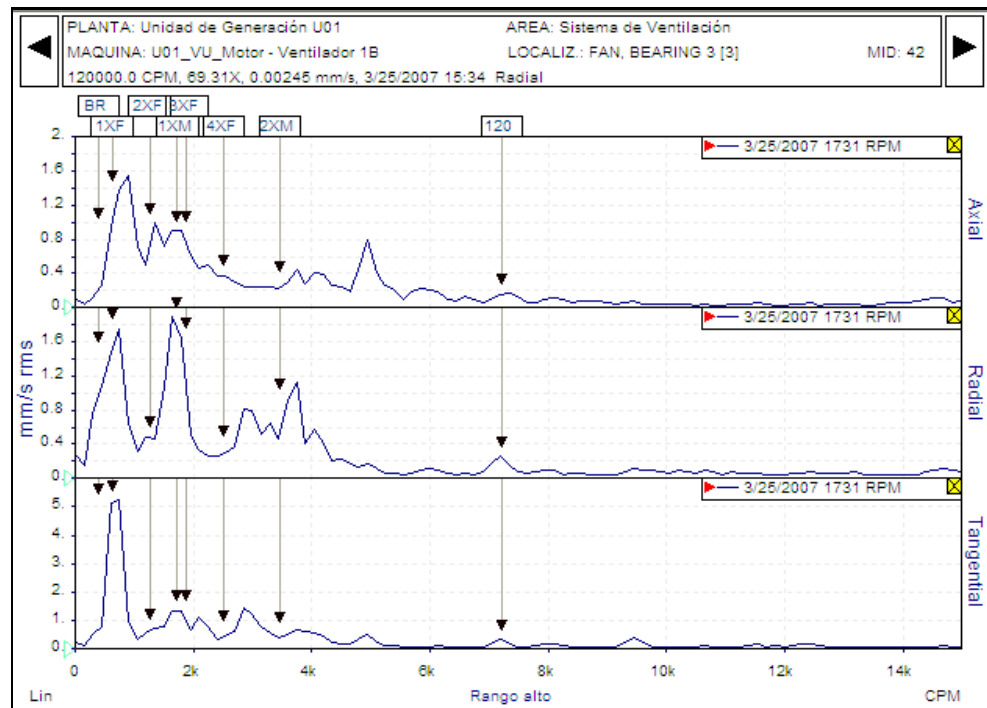
$7,08 \text{ mm/s} = 117 \text{ VdB en 1.00x en 1R.}$

4.7. Diagnóstico del sistema de ventilación.

4.7.1. Ventilador B.

- Medición realizada el 25/03/2007.





Frecuencia de excitación: 1XF.

Plano dominante: Radial y tangencial.

Problema: Flexibilidad transversal del ventilador acompañada de un leve desbalance del mismo.

Recomendación: Revisar la base del equipo de tal forma para detectar pernos flojos, corrosión, o fisuras en la estructura de montaje, monitorear frecuentemente el balance del ventilador de tal forma que una vez superado el límite admisible proceder a su respectivo balanceo.

Valores relevantes: 6 mm/s = 115,6 VdB en 1XF en 2T.

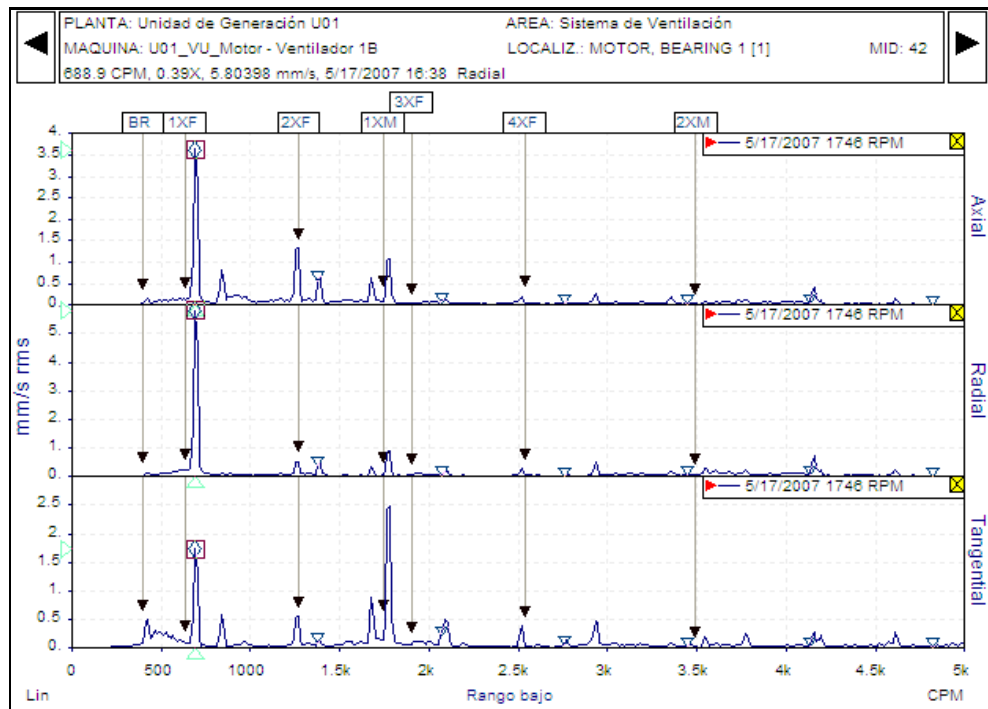
5,6 mm/s = 115 VdB en 1XF en 1R.

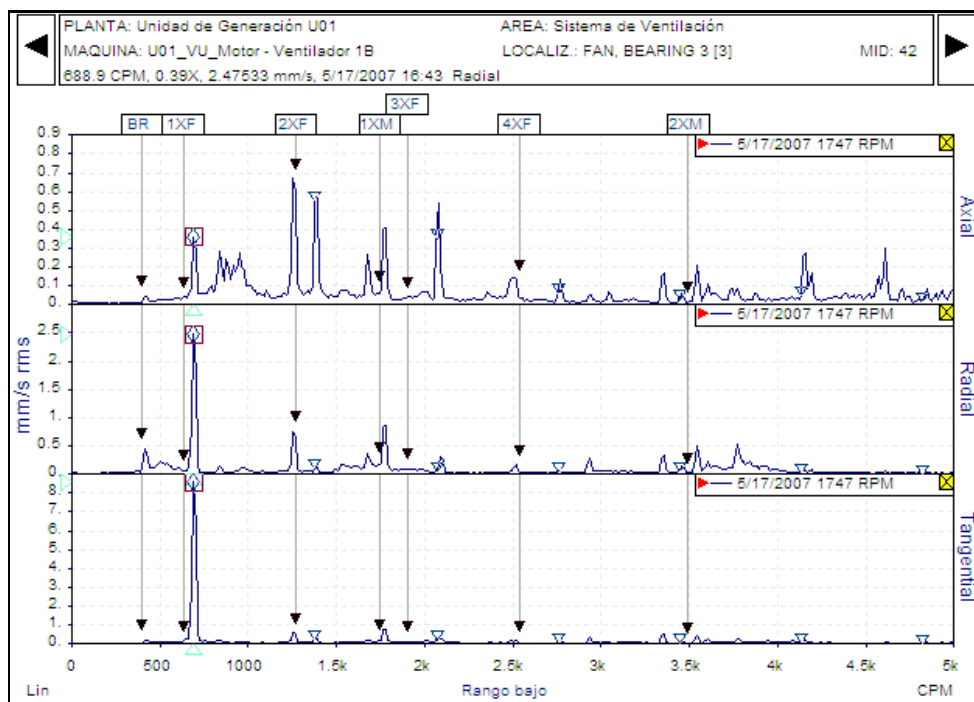
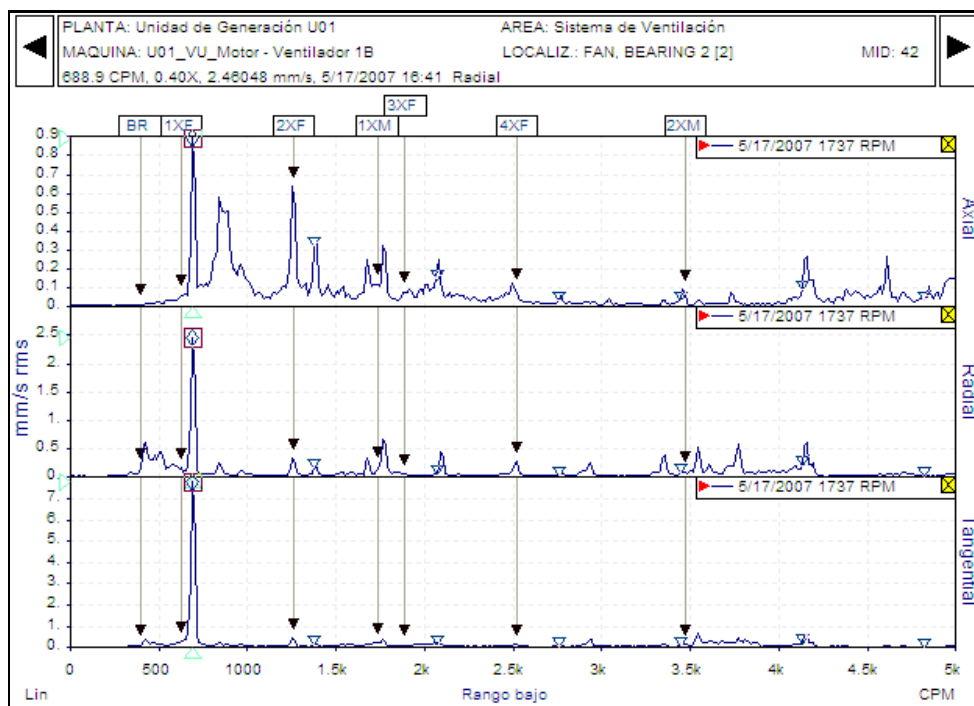
5,2 mm/s = 114,3 VdB en 1XF en 3T.

3 mm/s = 109,5Vdb en 1XF en 1A.

3 mm/s = 109,5Vdb en 1XF en 2R.

- Medición realizada el 17/05/2007.





Frecuencia de excitación: Asíncrona.

Plano dominante: Axial y radial en el punto 1. Tangencial en los puntos 2 y 3.

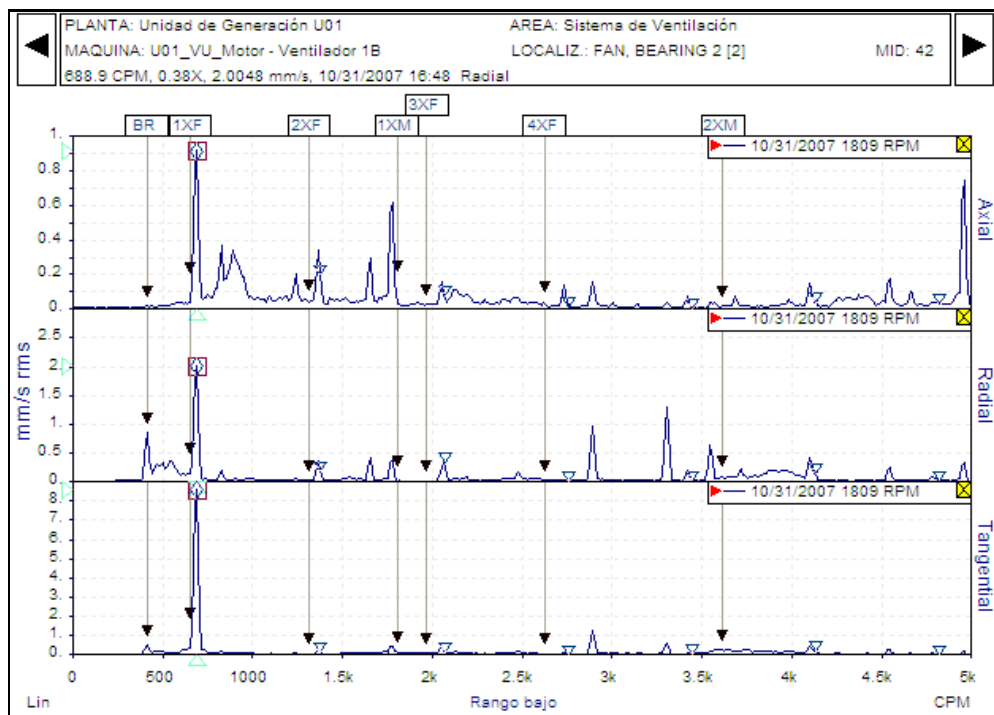
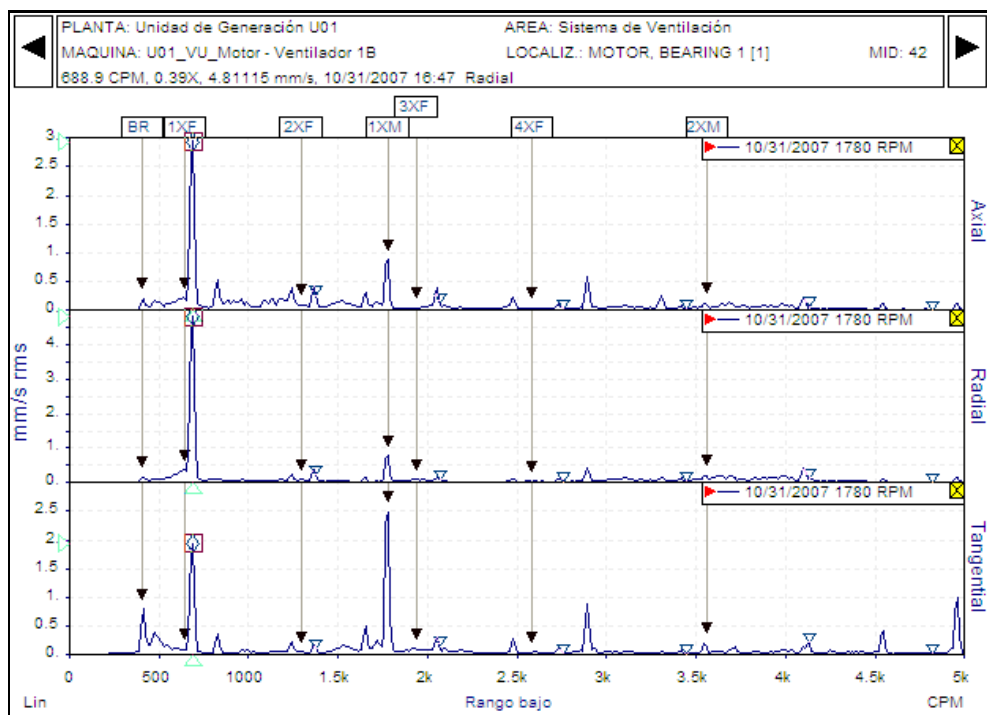
Problema: Falla de los rodamientos del ventilador y rodamiento del lado de carga en el motor ya que presenta frecuencia asíncrona. Los niveles de vibración son muy elevados.

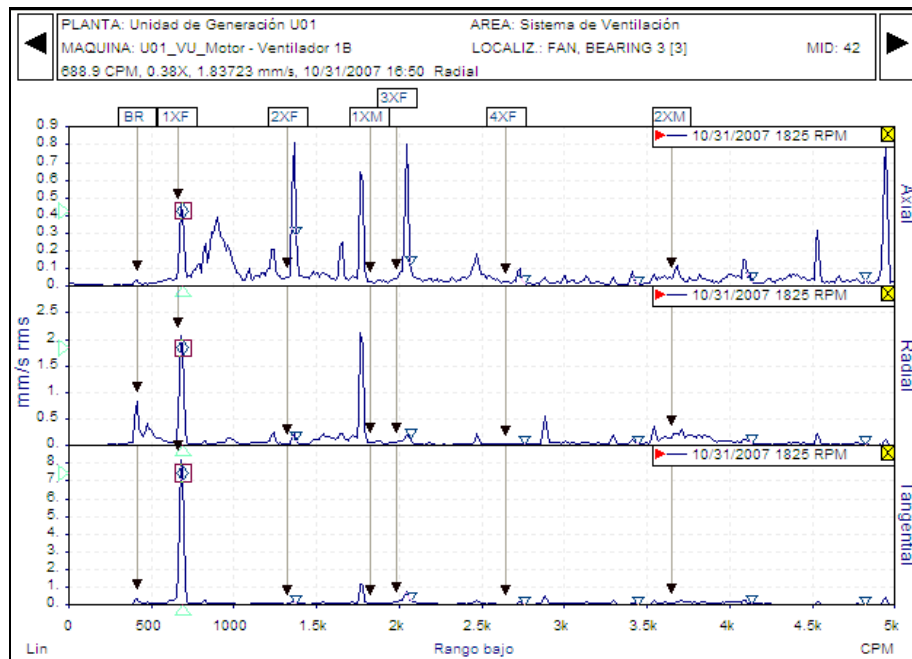
Recomendación: Cambio de rodamientos especialmente los que registran frecuencias asíncronas muy elevadas.

Valores relevantes: $8,92 \text{ mm/s} = 119 (+33) \text{ VdB en } 0.396X \text{ en } 3T$

$5,2 \text{ mm/s} = 114,3 \text{ Vdb} = \text{en } 0.396X \text{ en } 2R$

- **Medición realizada el 31/10/2007.**





Frecuencia de excitación: Asíncrona.

Plano dominante: Axial y radial en el punto 1. Tangencial en los puntos 2 y 3.

Problema: Flexibilidad transversal del ventilador, falla de rodamientos del ventilador, por la frecuencia asíncrona de los mismos y falla del rodamiento de motor que está en el lado de carga.

Recomendación: Revisar la base del equipo de tal forma para detectar pernos flojos, corrosión, o fisuras en la estructura de montaje, hacer el seguimiento del comportamiento de rodamientos del ventilador y motor, verificar su vida útil o sustituirlos por unos nuevos.

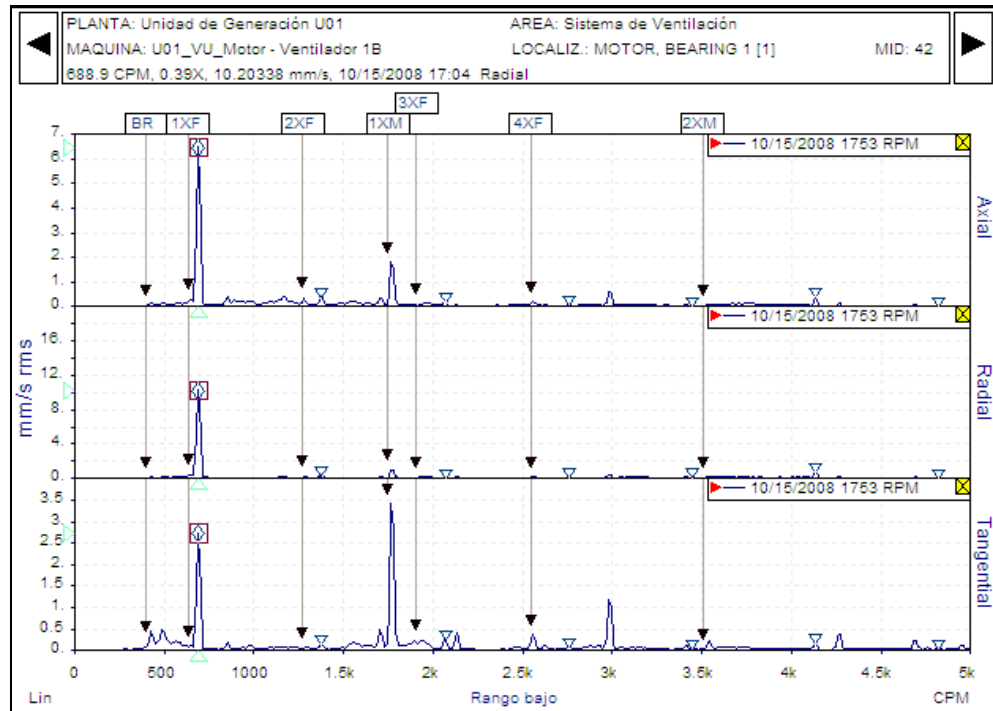
Valor relevante: 8,92 mm/s = 119 (+16) VdB en 0.378X en 2T.

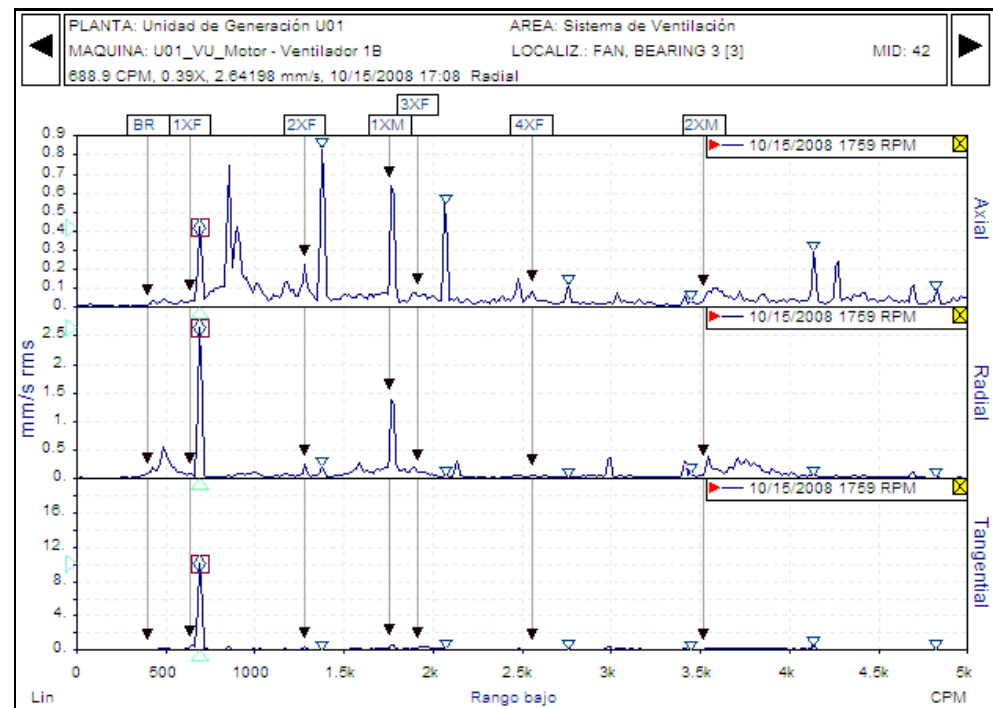
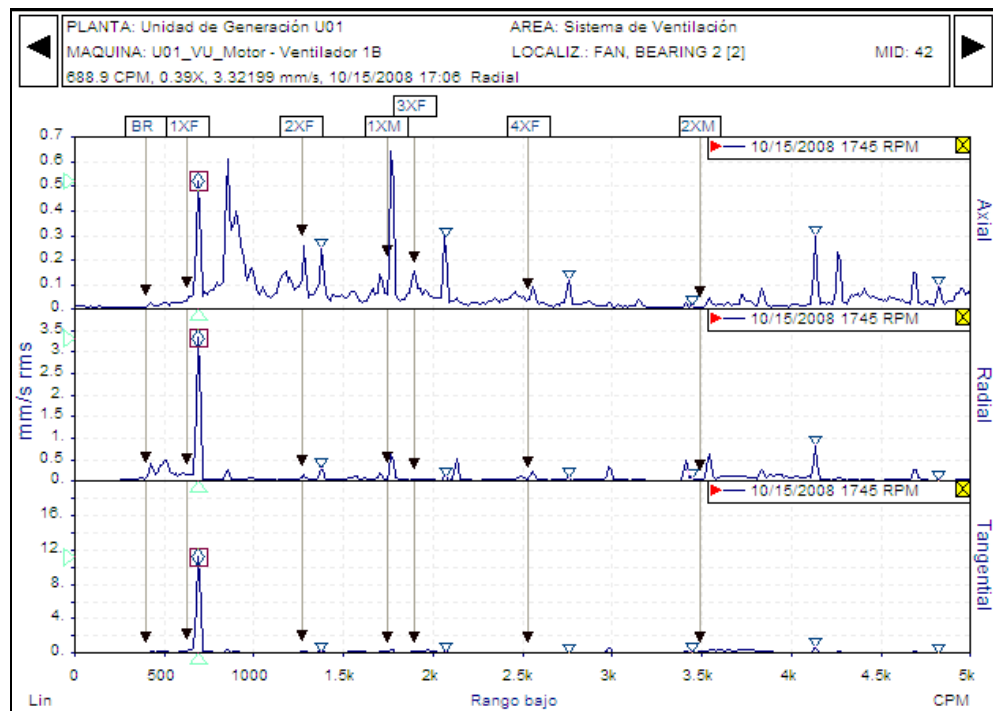
8,5 mm/s = 118.6 VdB en 1XF en 2T.

8 mm/s = 118,1 VdB en 1XF en 3T.

5 mm/s = 114 VdB en 1XF en 1R.

- Medición realizada el 15/10/2008.





Frecuencia de excitación: Asíncrona.

Plano dominante: Axial y radial en el punto 1. Tangencial en los puntos 2 y 3.

Problema: Desgaste de rodamientos del motor por frecuencia asíncrona y falla de rodamientos del ventilador, por presencia de picos asíncronos.

Recomendación: Cambio inmediato de rodamientos ya que las vibraciones han sobrepasado los límites tolerables.

Valores relevantes: $11,2 \text{ mm/s} = 121 (+21) \text{ VdB en } 0.395x \text{ en } 2T.$

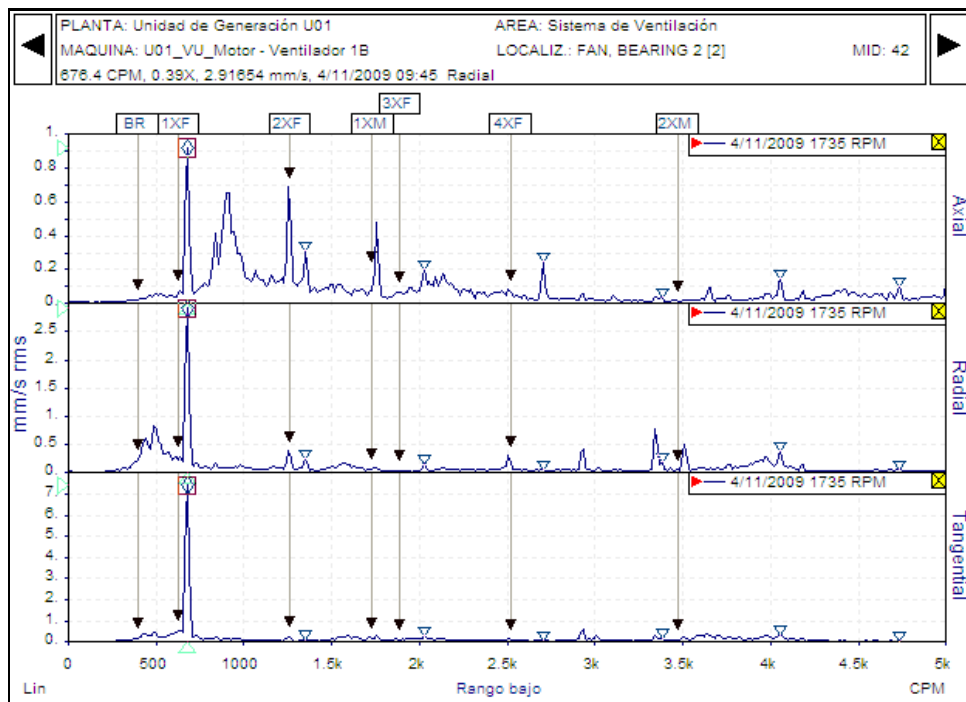
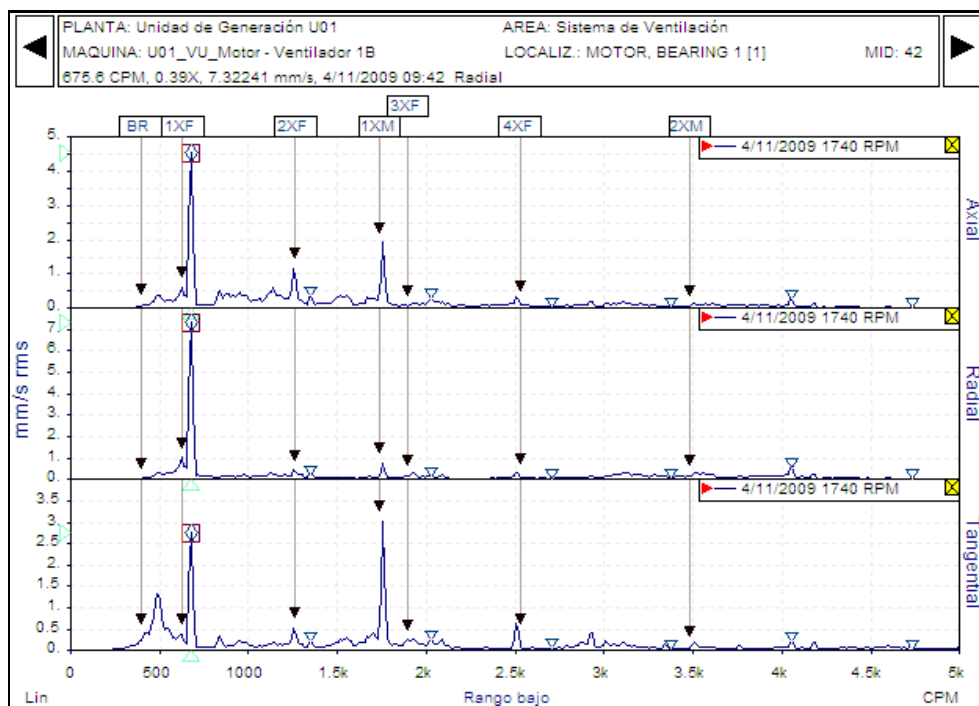
$10 \text{ mm/s} = 120 \text{ VdB en } 1XF \text{ en } 1R.$

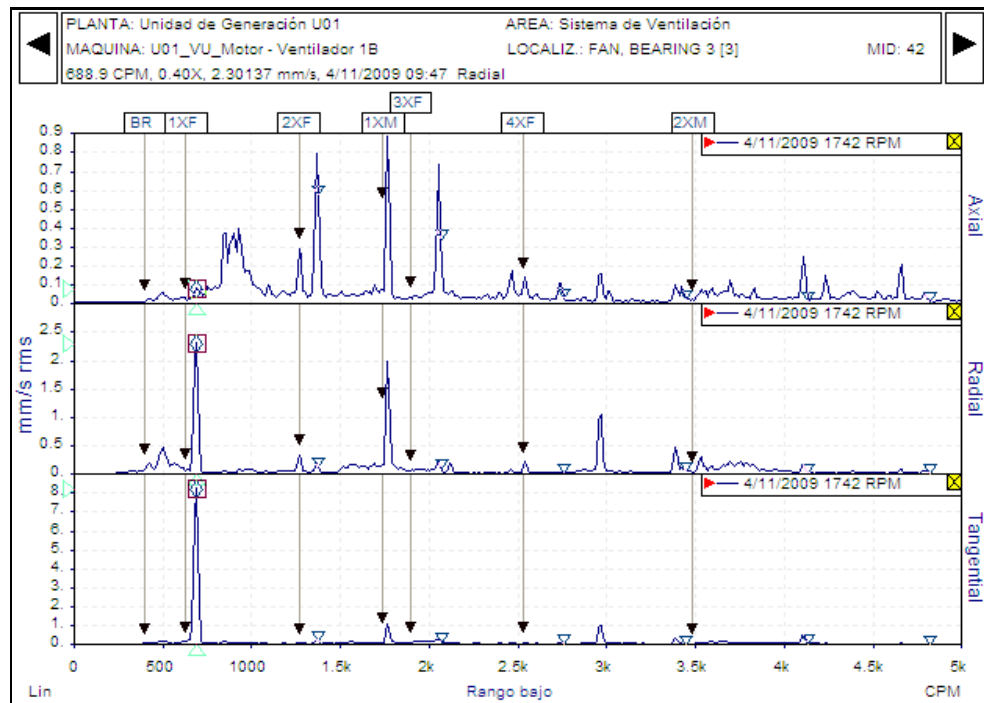
$10 \text{ mm/s} = 120 \text{ VdB en } 1XF \text{ en } 3T.$

$6,6 \text{ mm/s} = 116,4 \text{ Vdb en } 0.395x \text{ en } 1A.$

$6,5 \text{ mm/s} = 115,6 \text{ Vdb en } 0.395x \text{ en } 1R.$

- **Medición realizada el 11/04/2009.**





Frecuencia de excitación: Asíncrona.

Plano dominante: Axial y radial en el punto 1. Tangencial en los puntos 2 y 3.

Problema: Desgaste del rodamiento del motor por la frecuencia asíncrona y falla de rodamientos del ventilador por la aparición de frecuencias asíncronas en el punto 3.

Recomendación: Cambio de rodamientos.

Valores relevantes: 8.2 mm/s = 118,4 (+10) VdB en 1XF en 3T.

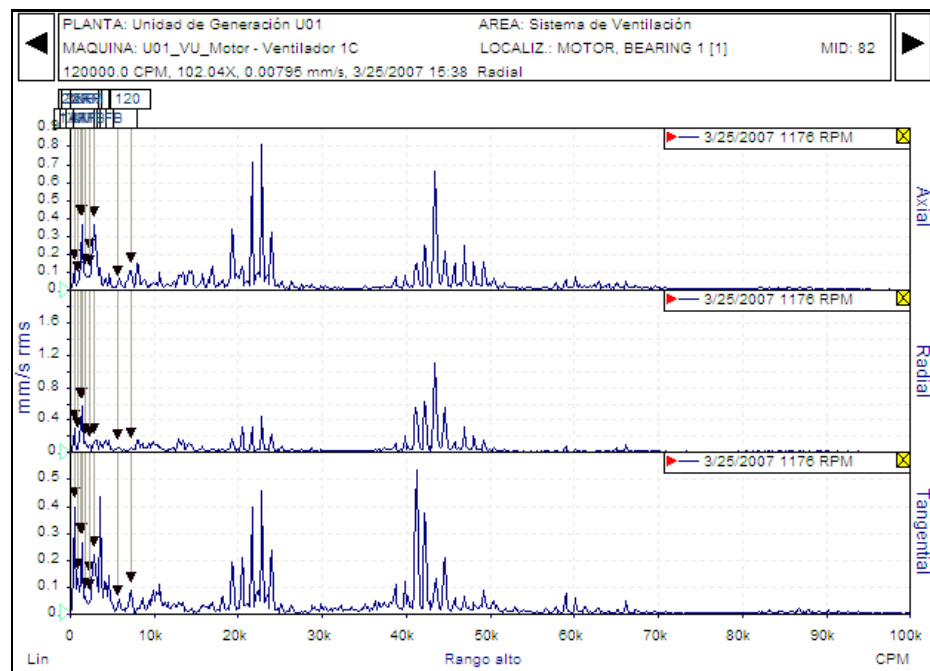
7,3 mm/s = 117,3 (+11) VdB en 1XF en 1R.

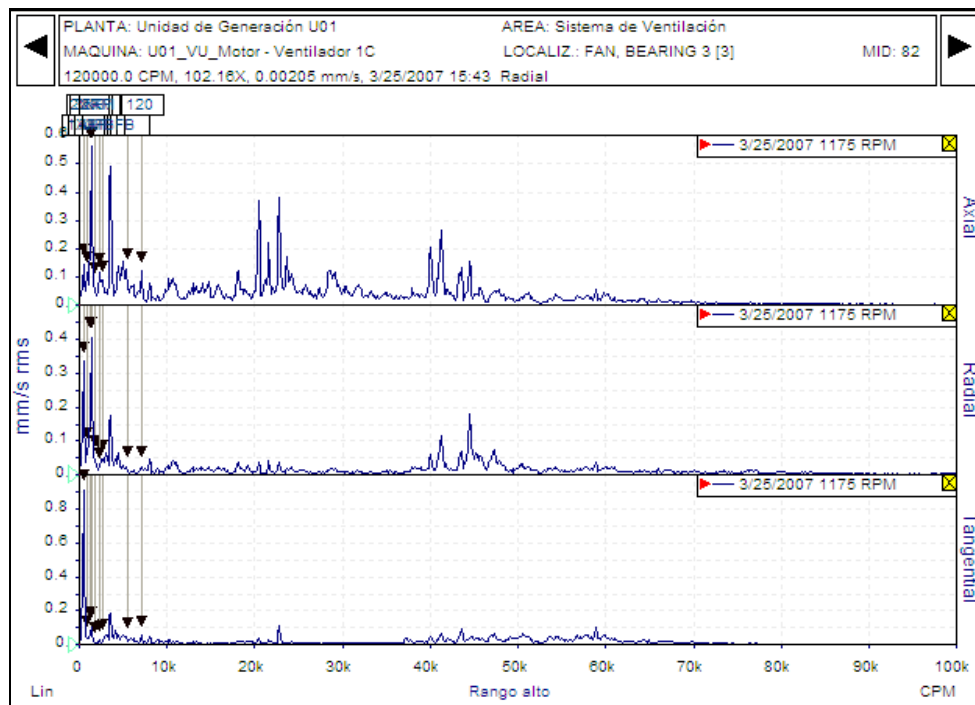
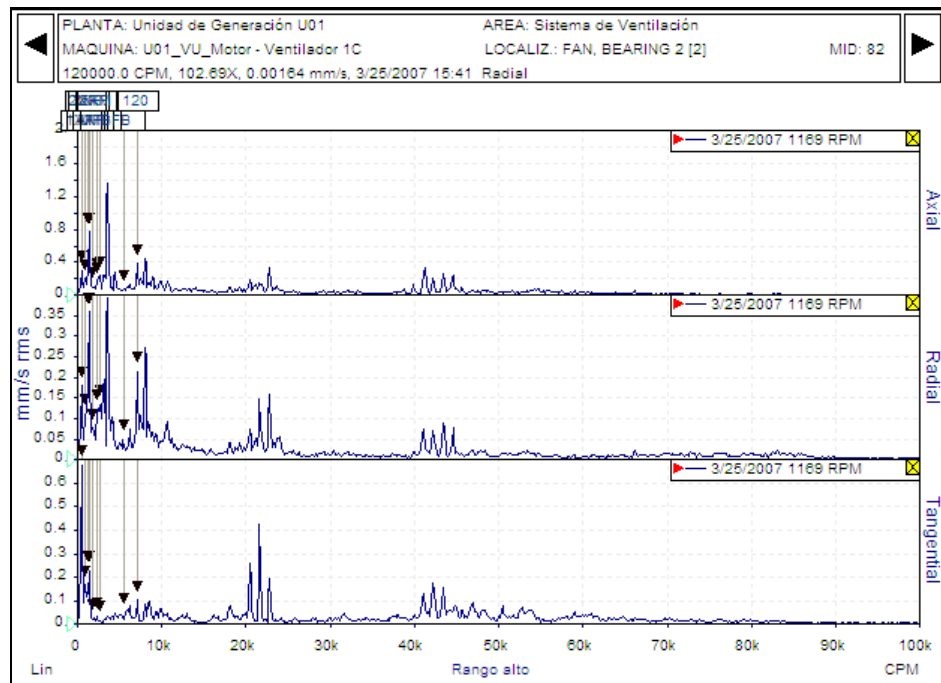
$7,3 \text{ mm/s} = 117,3 \text{ VdB en 1XF en 2T.}$

$4,5 \text{ mm/s} = 113,1 \text{ VdB en 1XF en 1A.}$

4.7.2. Ventilador C.

- Medición realizada el 25/03/2007.





Frecuencia de excitación: Asíncrona.

Plano dominante: Radial.

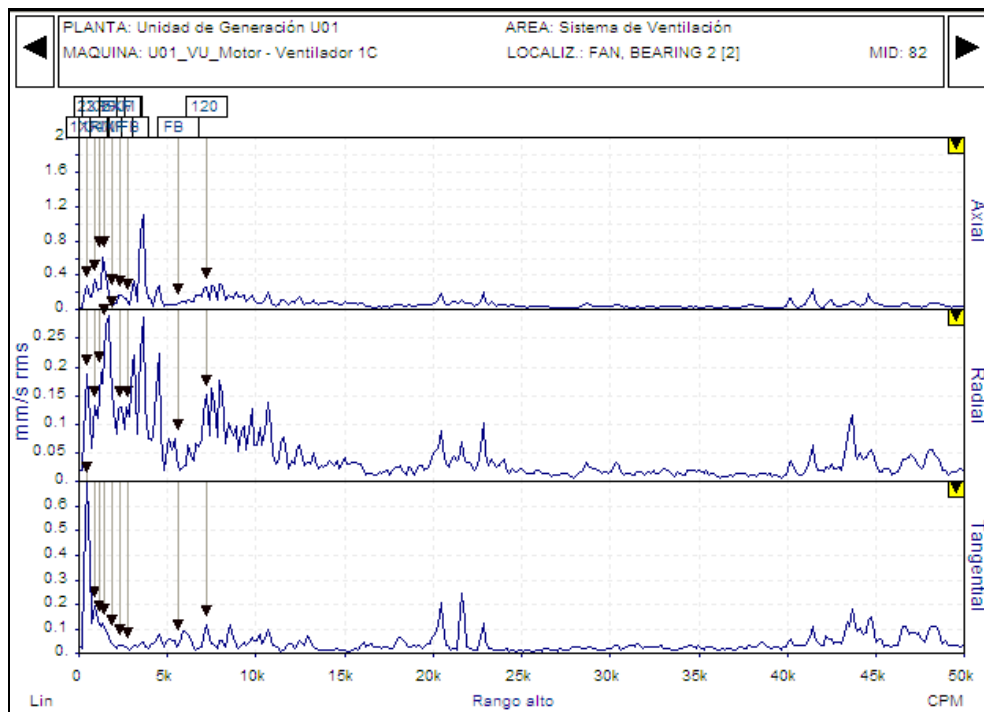
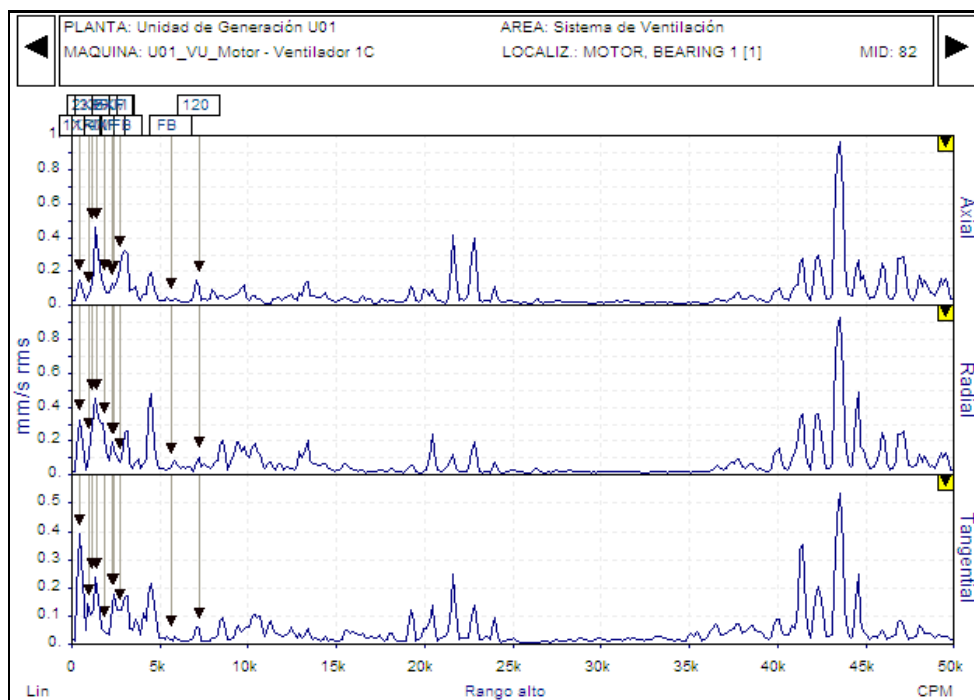
Problema: Desgaste del rodamiento del motor por la frecuencia asíncrona de 20,4X, y la presencia de armónico en alto rango. Aparición de picos en alto rango en el ventilador, que puede llegar a constituirse en falla de rodamientos.

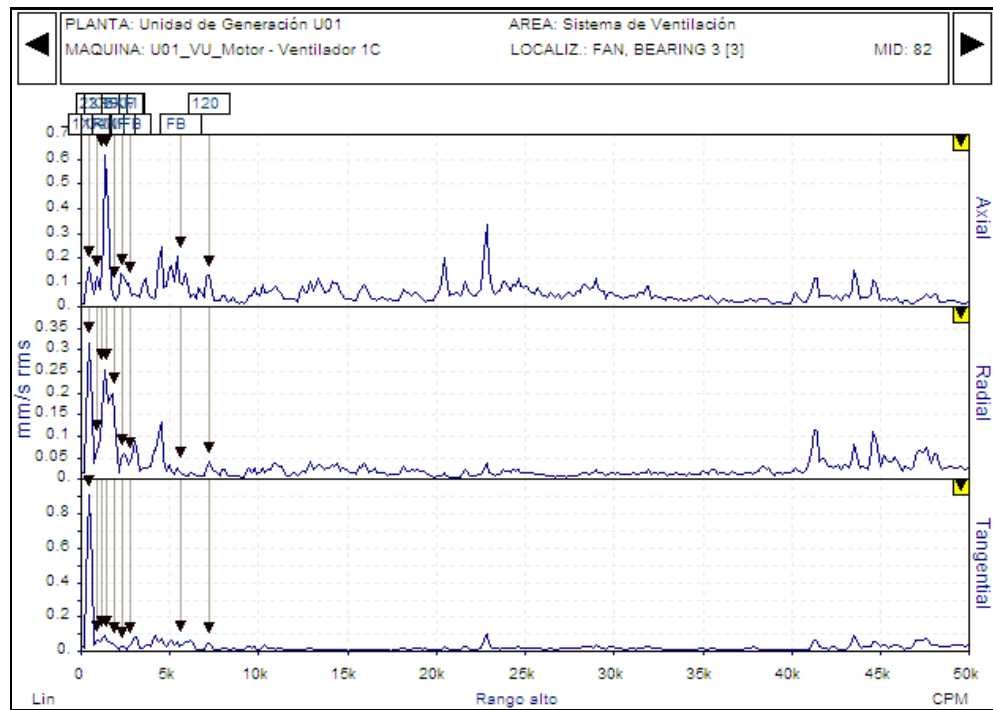
Recomendación: Cambio del rodamiento del lado de carga, que es el que se puede verificar la falla mientras que el rodamiento del lado libre no se puede comprobar por qué no hay punto de medida. Monitorear la evolución de las vibraciones del ventilador.

Valores relevantes: 1.41 mm/s = 103 VdB en 3XM en 2A.

1 mm/s = 110 VdB en 20.4 en 1R.

- Medición realizada el 17/05/2007.





Frecuencia de excitación: Asíncrona.

Plano dominante: Radial.

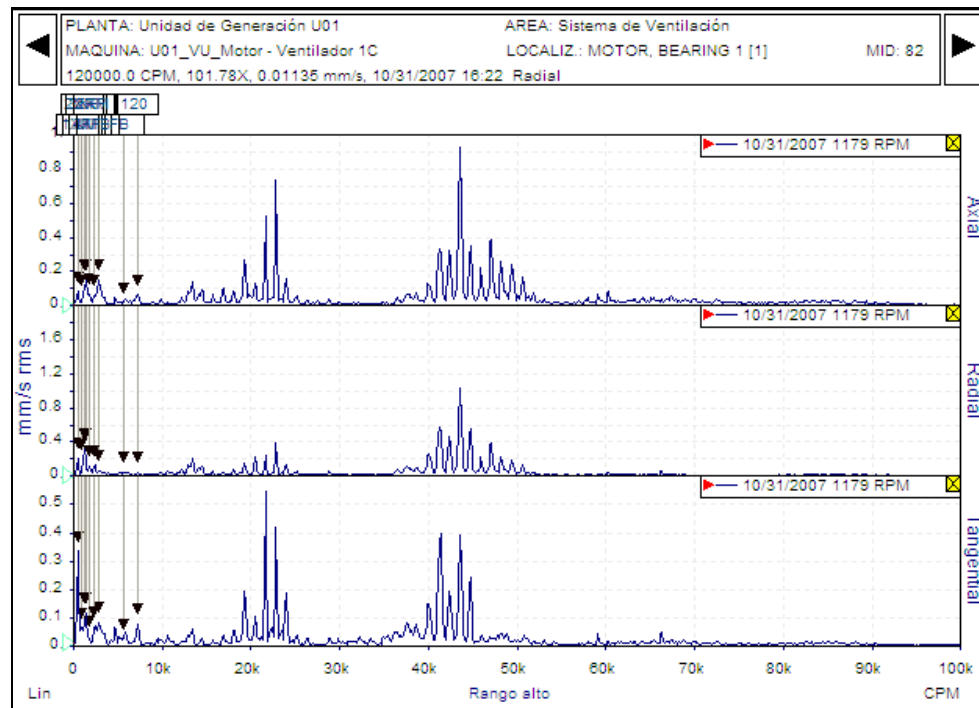
Problema: Se manifiesta el mismo problema de la medición anterior solo con la variación en la magnitud de las vibraciones. Las fallas son: desgaste del rodamiento del motor por la frecuencia asíncrona de 47.2 XM con armónicos en alto rango, y aparición de picos en alto rango que pueden llegar a constituirse como falla de rodamientos.

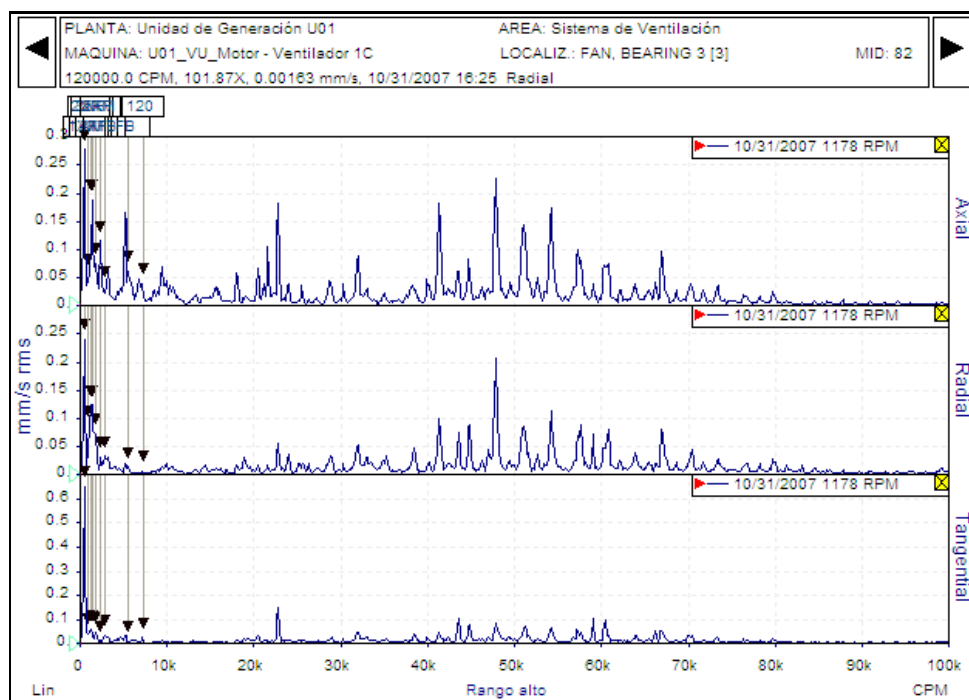
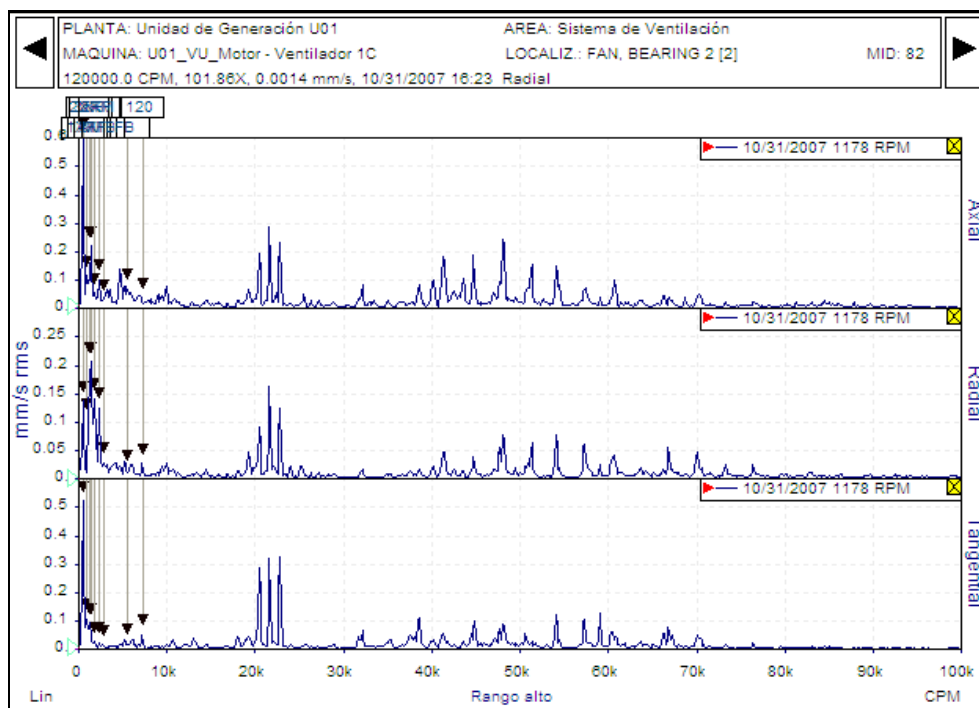
Recomendación: Cambio del rodamiento del lado de carga, en el que se puede verificar la falla, mientras que en el rodamiento del lado libre no se puede comprobar porque no hay punto de medida. Monitorear la evolución de las vibraciones del ventilador.

Valores relevantes: 1 mm/s = 110 VdB en 94.4 en 1R.

1 mm/s = 110 VdB en 94.4 en 1A

- Medición realizada el 31/10/2007.





Frecuencia de excitación: Asíncrona.

Plano dominante: Radial.

Problema: Desgaste del rodamiento del motor por la frecuencia asíncrona de 18.65 X con armónicos en el punto 1, y falla de rodamientos del ventilador en el punto 2 por la aparición de frecuencias asíncronas en alto rango a 44,96XF; falla de rodamientos del ventilador con frecuencias asíncronas en 87,79 XF con armónicos en el punto 3 en alto rango.

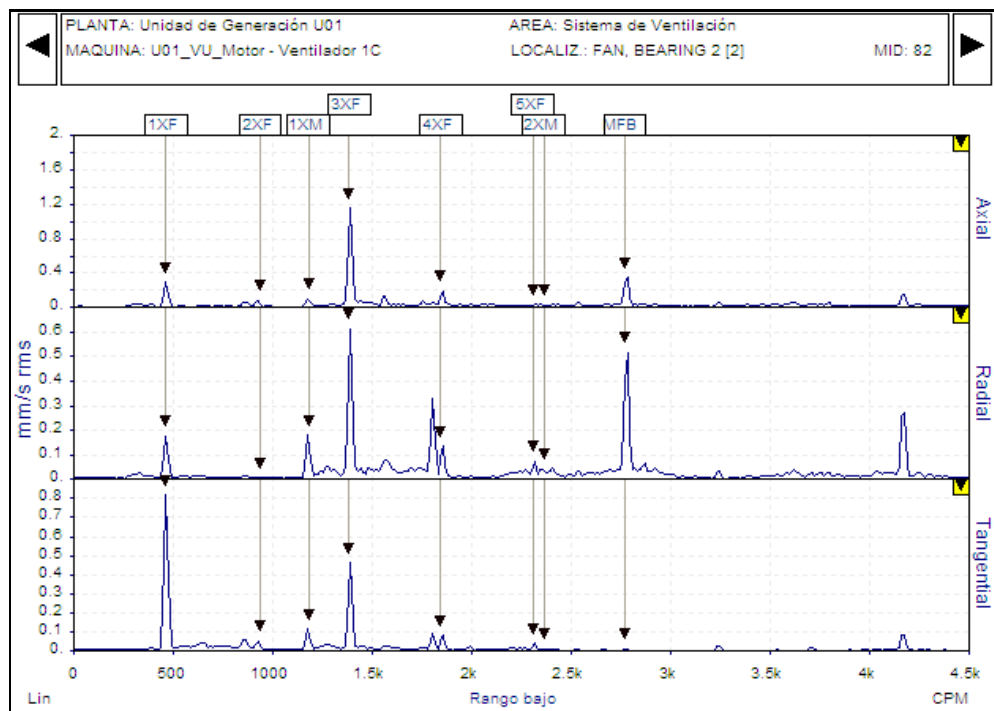
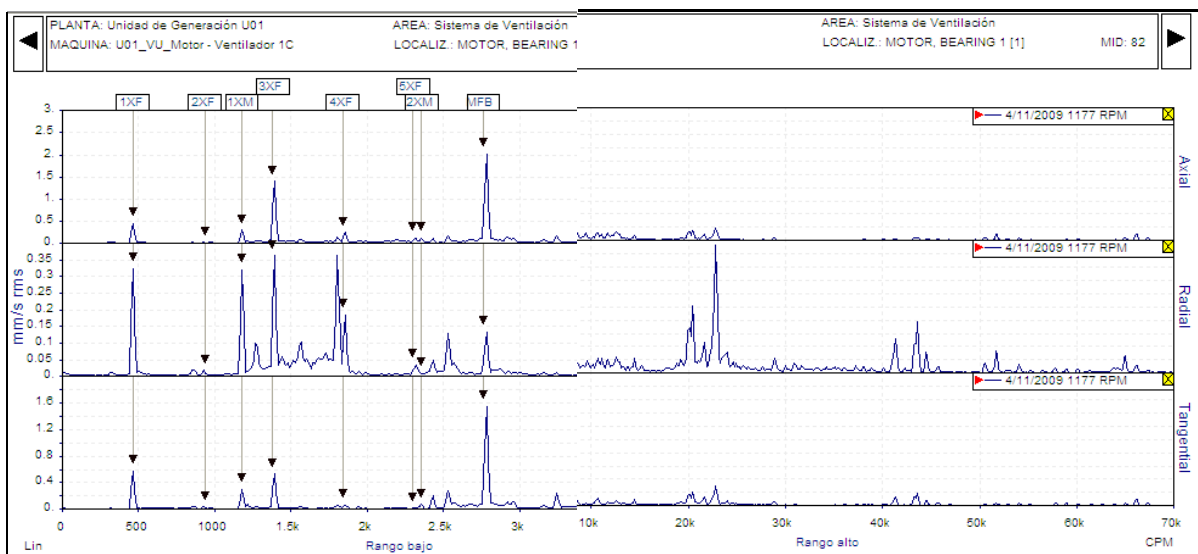
Recomendación: Cambio del rodamiento del lado de carga, en el que se puede verificar la falla mientras que en el rodamiento del lado libre no se puede comprobar porque no hay punto de medida. Cambio de los 2 rodamientos del ventilador.

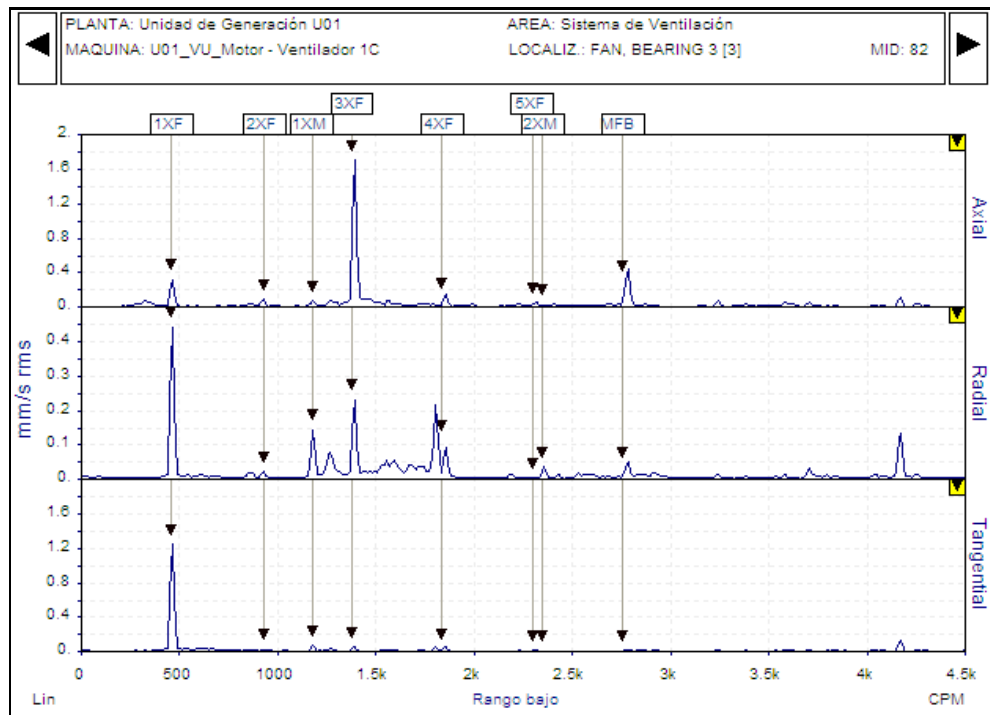
Valores relevantes: 1 mm/s = 100 VdB en 37,31XM en 1R.

0.2 mm/s = 86 VdB 102,78 XF en 3R

0.16 mm/s = 84.1 VdB en 44,96 en 2R.

- **Medición realizada el 11/04/2009.**





Frecuencia de excitación: Asíncrona.

Plano dominante: Radial.

Problema: Desgaste del rodamiento del motor por la frecuencia asíncrona de 20.39XM con bandas laterales y armónicos en el punto 1.

Recomendación: Cambio del rodamiento del lado de carga, en el que se puede verificar la falla mientras que en el rodamiento del lado libre no se puede comprobar por qué no hay punto de medida.

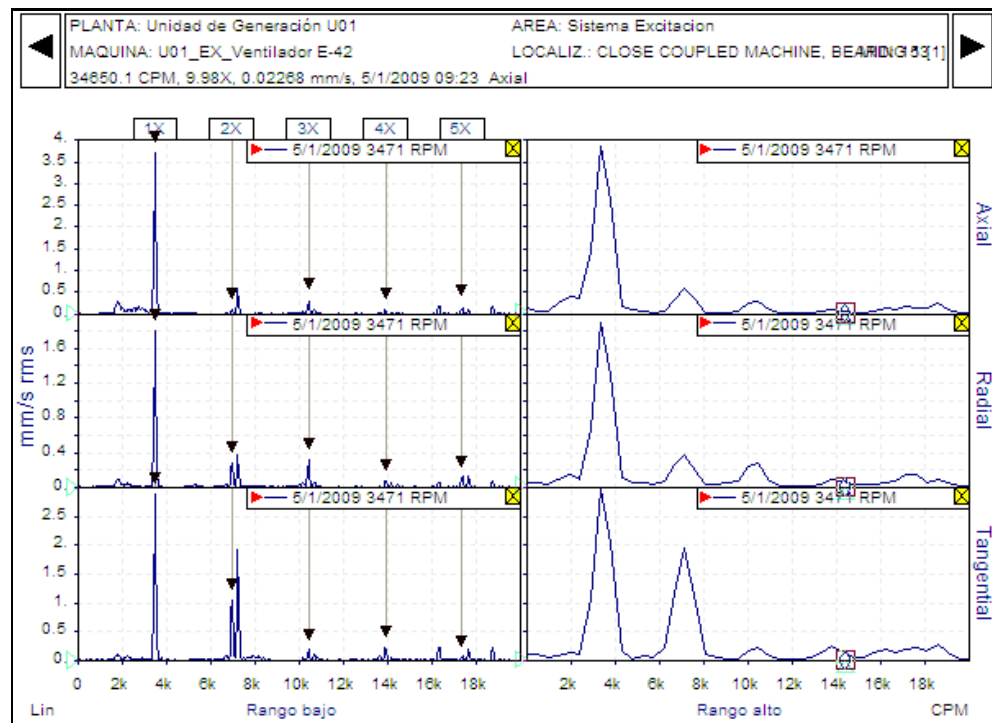
Valores relevantes: 0.4 mm/s = 92 VdB en 18.69 XM en 1R.

$$0.12 \text{ mm/s} = 81.6 \text{ VdB } 37,31 \text{ XM en 1R}$$

4.8. Diagnóstico del sistema de excitación.

4.8.1. Ventilador V42.

- Medición realizada el 01/05/2009.



Frecuencia de excitación: 1 X.

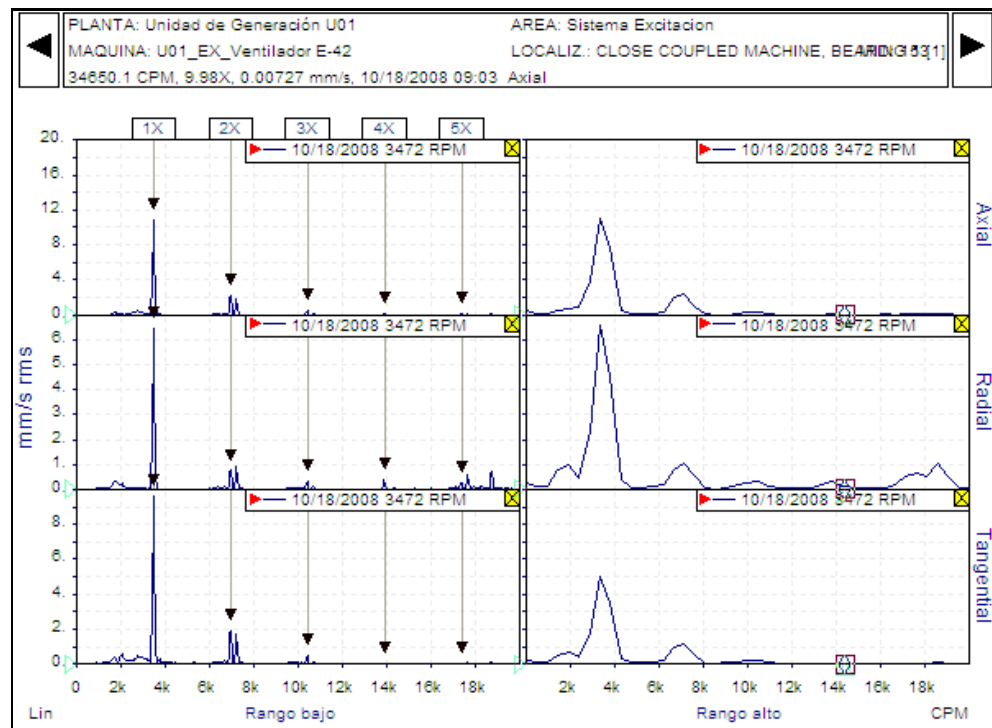
Plano dominante: Axial.

Problema: Desbalance de rotor en voladizo, lo que da como resultado el desbalance del ventilador.

Recomendación: Balancear el equipo según las dimensiones del mismo.

Valor relevante: $3,7 \text{ mm/s} = 111,4 \text{ VdB en 1X}$.

- Medición realizada el 18/10/2008.



Frecuencia de excitación: 1 X F.

Plano dominante: Axial, radial y tangencial

Problema: Desbalance de rotor en voladizo o desbalance del ventilador y flexibilidad transversal.

Recomendación: Balancear en los planos correspondientes según las dimensiones del equipo.

Verificación de pernos flojos, corrosión o fisuras en la estructura de montaje

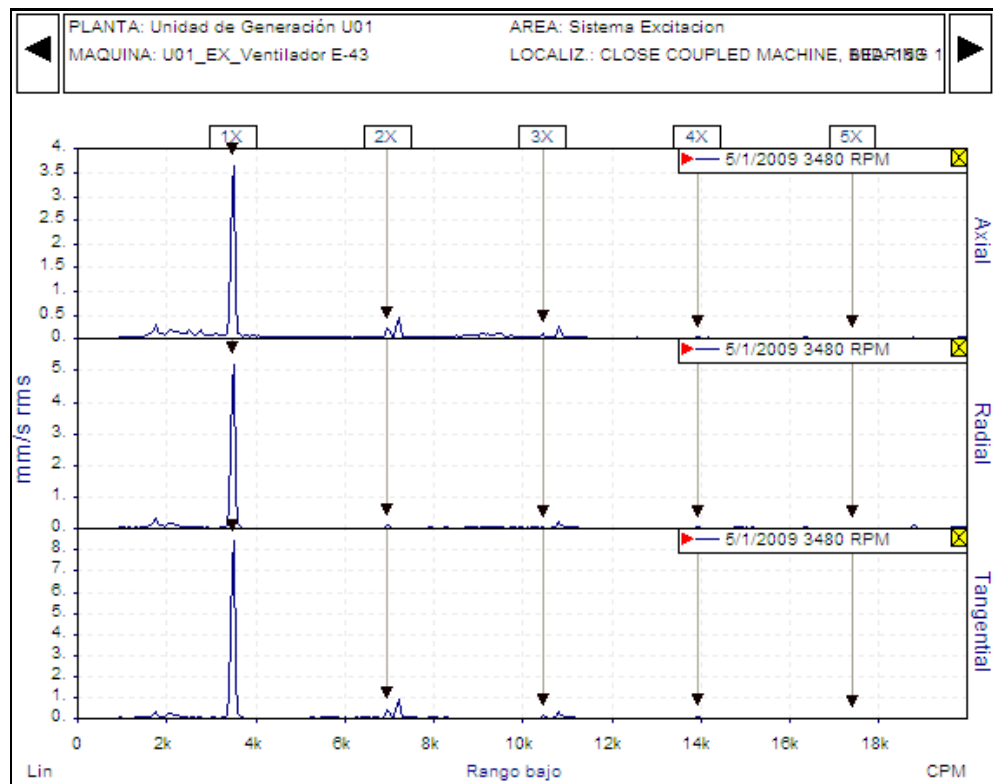
Valores relevantes: $10,3 \text{ mm/s} = 120,3 \text{ Vdb en 1X en 1A}$.

$9.7 \text{ mm/s} = 119,7 \text{ Vdb en 1X en 1T}$.

$6.5 \text{ mm/s} = 116,3 \text{ VdB en 1X en 1R}$.

4.8.2. Ventilador V43.

- Medición realizada el 01/05/2009.



Frecuencia de excitación: 1 X F.

Plano dominante: Axial, radial y tangencial

Problema: Desbalance de rotor en voladizo y flexibilidad transversal.

Recomendación: Balancear en los planos correspondientes según las dimensiones del equipo.

Verificación de pernos flojos, corrosión o fisuras en la estructura de montaje

Valores relevantes: 8,3 mm/s = 118.4 Vdb en 1X en 1T.

5.1 mm/s = 114.1 VdB en 1X en 1R.

3.6 mm/s = 111.1 Vdb en 1X en 3A.

4.9. Análisis y discusión de resultados del diagnóstico vibracional.

4.9.1. Análisis de Pareto de las fallas detectadas por el equipo analizador de vibraciones.

Las fallas que se indican a continuación son las obtenidas mediante los registros de los espectros de vibraciones desde el año 2006 hasta el año 2009, ya que los obtenidos en fechas anteriores solo determinaban el estado de falla, pero no identificaban a la misma.

De igual forma analizando los espectros de las 26 fallas determinadas, se pudo identificar 12 fallas que complementaban a las recomendaciones que da el equipo analizador de vibraciones.

TABLA XXXV. FRECUENCIA Y PORCENTAJES DE FALLOS DETERMINADAS

Falla	Frecuencia	Porcentaje	Porcentaje acumulado
Rodamientos	16	42,11	42,11
Desbalanceo	10	26,32	68,42
Flexibilidad transversal	9	23,68	92,11
Desalineación	2	5,26	97,37

Desbalanceo de fase eléctrica	1	2,63	100,00
	38		

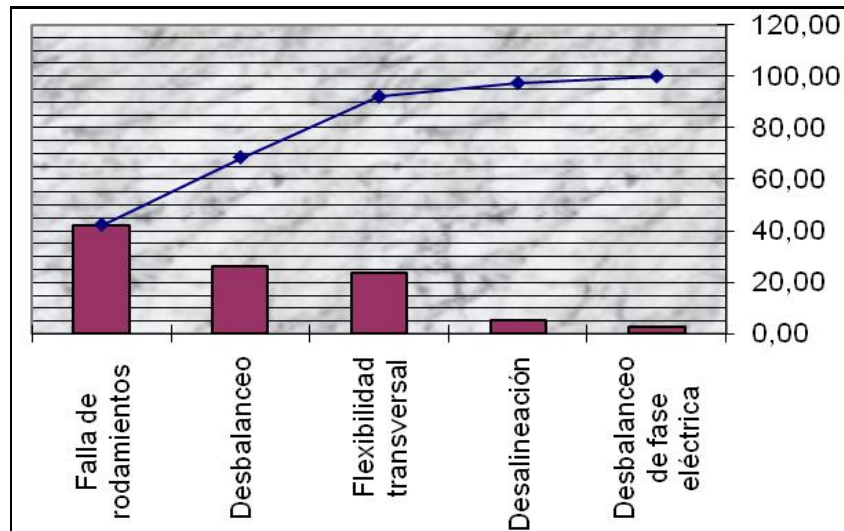


Figura 27. Diagrama de Pareto de las fallas registradas

- Análisis del diagrama de Pareto.** El diagrama de Pareto nos indica que el 80% de fallos es ocasionada por el deterioro de los rodamientos y el desbalance de los equipos rotativos. Recomendaciones sobre desbalance y desalineación se puede ver en el ANEXO 3.
- Discusión de resultados de diagrama de Pareto.** El deterioro de rodamientos es la consecuencia final de todas las fallas que se pueden detectar en equipos rotativos, ya que todas estas afectan a los puntos de soporte que son los rodamientos y cojinetes, lo cual nos indica que las fallas que se han presentado no están siendo corregidas a tiempo cuando estas

se manifiestan. Por otra parte la segunda causa de fallas es el desbalance, lo que quiere decir que existe una frecuente aglomeración desigual de polvo en los rotores, falta de homogeneidad en partes coladas, como burbujas, partes porosas, excentricidad del rotor, flexión de ejes, distribución desigual en las barras de rotor de motores eléctricos o en los bobinados, erosión y corrosión desigual de las impulsoras de bombas, ventiladores etc.

4.9.2. Análisis de Pareto para las fallas de equipos rotativos por sistemas.

A continuación se determinan los equipos rotativos de los sistemas que más fallas han registrado, desde el año 2001 hasta el año 2009.

Este análisis está basado en los registros que se determinaron mediante el medidor de impulsos de choque (SPM) y el analizador de vibraciones (DCX).

TABLA XXXVI. FRECUENCIA Y PORCENTAJES DE FALLOS DE EQUIPOS ROTATIVOS POR SISTEMAS

Sistema	Frecuencia	Porcentaje	Porcentaje acumulado
Ventilación	31	37,35	37,35

Alta presión	18	21,69	59,04
Agua de enfriamiento	13	15,66	74,70
Acumulación y bombeo	10	12,05	86,75
Excitación	6	7,23	93,98
Frenos y gatos	5	6,02	100,00
Hidrogenerador	0	0,00	100,00
Transformador	0	0,00	100,00
	83		

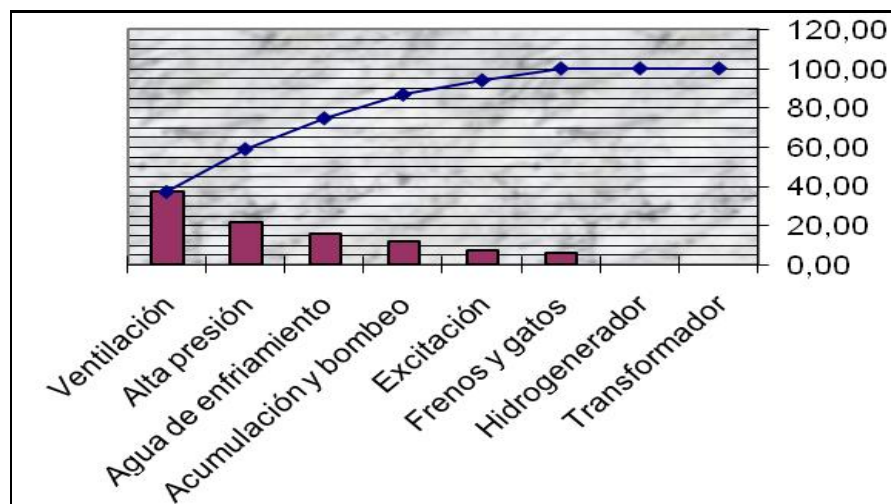


Figura 28. Diagrama de Pareto de las fallas de los equipos rotativos por sistemas

- Análisis del diagrama de Pareto.** El diagrama de Pareto nos indica que el 80% de fallos es ocasionada por los equipos rotativos del sistema de ventilación, alta presión y agua de enfriamiento.

- **Discusión de resultados de diagrama de Pareto.** Los ventiladores del sistema de ventilación en su mayor parte se detectó fallas de rodamientos; en la motobomba del sistema de alta presión, la mayor cantidad de fallas que se detectó fue por desbalance y las motobombas del sistema de agua de enfriamiento registró fallos con el equipo medidor de impulsos de choque, es decir frecuentemente estuvo en la zona de precaución y alarma. Se puede apreciar que los equipos rotativos de mayor influencia en el proceso productivo son los que menos han fallado, mientras los que más han fallado son los equipos auxiliares como son ventiladores y la motobomba del sistema de arranque y parada de la unidad.

CAPÍTULO V

5. ANÁLISIS DE FIABILIDAD DE EQUIPOS ROTATIVOS

El análisis de fiabilidad de equipos rotativos puede ser de una forma práctica cuando no existe registro histórico de fallo [7]. El análisis de fiabilidad se puede hacer también de una forma estadística mediante las distribuciones de probabilidad cuando existe el histórico de fallos, esta metodología es la más recomendada [14].

Existen algunos equipos que no se los puede evaluar mediante la distribución de Weibull, ya que el sistema de mantenimiento vigente ha determinado una estabilidad vibracional de los mismos, de tal forma que se utiliza los últimos registros de pruebas, mediciones tomadas por el departamento de mantenimiento y el centro de control de alarmas; datos que se utilizan para realizar en análisis de fiabilidad práctica.

Para equipos que han registrado fallas se utiliza la distribución Weibull, de forma que se puede hacer un análisis de fiabilidad mediante probabilidades estadísticas.

A continuación se hace el análisis práctico de fiabilidad y luego el análisis de fiabilidad mediante el sistema informático Relest.

5.1. Cálculo de fiabilidad del hidrogenerador.

5.1.1. Inspección visual.

TABLA XXXVII. INSPECCIÓN VISUAL DEL HIDROGENERADOR

Factores	Observación	Valor	Puntos
Toma de fuerza, o condiciones de puesta en servicio	La unidad empieza a funcionar sin problemas, ya que las condiciones de puesta en servicio son supervisadas por personal técnico y comprobadas con equipos de metrología e instrumentación correspondiente luego de la ejecución del programa de mantenimiento preventivo y predictivo	10	9
Conversión de energía y condiciones externas, luego de poner a funcionar el equipo	La unidad mantiene una buena eficiencia energética a pesar de los años de funcionamiento	10	8
Transmisión de poder	La transmisión es directa desde la turbina al generador luego al transformador para luego pasar a la red eléctrica	10	10
Cimentaciones, carcasa, y soportes	La cimentación y soportes tienen aproximadamente 32 años desde su construcción y puesta en servicio. Las carcasas se protegen de la corrosión con recubrimientos plásticos o pinturas	5	3
Controles, sensores, e instrumentación	La mayor parte de sensores e instrumentación son electromecánicos y unos pocos son electrónicos.	5	3
Total		40	33

5.1.2. Pruebas y mediciones.

TABLA XXXVIII. MEDICIÓN ELÉCTRICA DEL HIDROGENERADOR

	Variable de diseño	Variable medida	Desviación
Potencia	111 MVA	100 a 105 MVA normalmente	-7,65 %
Tensión generada	13.8 KV	13.56 Kv	-1.74 %
Corrientes con 100 MVA	Valor calculado a 100 MVA		
Fase A	4257,7 A.	4080 A	- 4,16 %
Fase B	4257,7 A.	4150 A	- 2,53 %
Fase C	4257,7 A.	4200 A	- 1,36 %

Desviación promedio en pruebas eléctricas - 7.65 %

TABLA XXXIX. MEDICIÓN DE TEMPERATURA DEL HIDROGENERADOR

Metal de los cojinetes del generador	Valores referenciales	Valores medidos	Desviación
Empuje	65,7 °C	72,9 °C	+10,96 %
Superior	64 °C	56,3 °C	-12,03 %
Inferior	49 °C	51,4 °C	+4,9 %
Acete	Valores referenciales	Valores medidos	Desviación
Superior	45,3 °C	48,2 °C	+6,4 %
Inferior	45,3 °C	39,9 °C	-11,92 %
Cojinete turbina	Valores referenciales	Valores medidos	Desviación
Metal	54,8 °C	47,8	-12,77 %
Acete	36 °C	37,2	+3,33 %

Desviación promedio en pruebas de temperatura - 1,59 %

TABLA XL. MEDICIÓN DE VIBRACIONES DEL HIDROGENERADOR

Punto 1			
Boquillas de la turbina NO Z	A x i a l	R a d i a l	T a n g e n c i a l
Valor medido m m / s	0,6	0,30	0,2
Valores promedios	0,8	0,35	0,35
Punto 2			
Polos del generador G P	A x i a l	R a d i a l	T a n g e n c i a l
Valor medido en m m / s	0,08	0,04	0,05
Valores promedios en m m / s	0,12	0,08	0,05
Punto 3			
Polos del generador G P	A x i a l	R a d i a l	T a n g e n c i a l
Valor medido en m m / s	0,55	0,5	0,45
Valores promedios en m m / s	0,9	0,9	0,4

Para la medida de vibraciones, se consideró los valores más elevados de frecuencia de fallo que pueda determinar en la turbina.

Como se puede apreciar todos los valores medidos están dentro del estado de buen técnico, por lo que el porcentaje de desviación es 0 % .

TABLA XLI. PUNTAJE DE PRUEBAS Y MEDICIONES DEL HIDROGENERADOR

Con d i c i o n e s	P u n t o s	M e d i c i ó n e l é c t r i c a	M e d i c i ó n d e t e m p e r a t u r a	M e d i c i ó n d e v i b r a c i o n e s
N o r m a l e s	3 0			X
5 % b a j o o s o b r e e l r é g i m e n .	2 8		X	
1 0 % b a j o o s o b r e e l r é g i m e n .	2 0	X		
2 0 % b a j o o s o b r e e l r é g i m e n .	1 5			
2 5 % b a j o o s o b r e e l r é g i m e n .	0			

De las pruebas y mediciones se obtiene un promedio de 26 puntos.

5.1.3. E d a d .

La unidad viene funcionando desde el año 1983 es decir tiene 26 años.

TABLA XLII. PUNTAJE RESPECTO A LA EDAD DEL HIDROGENERADOR

A ñ o s	P u n t o s	
0 - 2	1 0	
3 - 1 2	9	
1 3 - 1 5 .	8	
1 6 - 2 0	7	
M á s d e 2 0	6	X

5.1.4. Medio ambiente.

La temperatura de operación del generador supera los 55°C , mientras que la turbina por su naturaleza de operación opera en un ambiente húmedo.

**TABLA XLIII. PUNTAJE RESPECTO AL MEDIO AMBIENTE DEL
HIDROGENERADOR**

Medio ambiente	Puntos	
Limpio y seco	10	
Caliente sobre los 55°C	9	X
Humedad	8	X
Polvoriento	7	
Vapor corrosivo	6	

Por tanto el puntaje promedio será 8,5.

5.1.5. Ciclo de trabajo.

Según el historial de la carga generada desde el mes de mayo del año 1999 hasta la presente fecha: Agosto del 2009, de acuerdo a la demanda de generación hidroeléctrica, se registran:

TABLA XLIV. PRODUCCIÓN DE LA UNIDAD DE GENERACIÓN 1

Generación promedio mensual	38347,129 MVA
Generación promedio diaria	1278,23763 MVA
Generación promedio por hora	53,2599014 MVA

Es decir la unidad produce aproximadamente al 50% de su capacidad de generación, por tanto se elige que el equipo opera a media carga y trabaja en un proceso continuo según la demanda y la disponibilidad del equipo.

TABLA XLV. PUNTAJE RESPECTO AL CICLO DE TRABAJO DEL HIDROGENERADOR

Ciclo de trabajo	Puntos	
Dentro de la temperatura y carga	10	
Trabajo a corto tiempo	9	
Trabajo continuo	8	X
Carga media	7	X
Carga fuerte	6	

El puntaje promedio es de 7,5.

5.1.6. Resultados.

**TABLA XLVI. PUNTAJE CORRESPONDIENTE A LA FIABILIDAD PRÁCTICA DEL
HIDROGENERADOR**

Inspección Visual	33
Pruebas y Mediciones	26
Edad	6
Medio Ambiente	8,5
Ciclo de Trabajo	7,5
Total de puntos	81

- Probabilidad de trabajo sin fallo $R(t) = 81\%$.
- Probabilidad de fallo $F(t) = 19\%$.

Este equipo rotativo se encuentra dentro del rango óptimo de fiabilidad, de tal forma que el hidrogenerador 1 es técnicamente fiable.

5.2. Cálculo de fiabilidad de las motobombas del transformador.

5.2.1. Inspección visual.

TABLA XLVII. INSPECCIÓN VISUAL DE LAS MOTOBOMBAS DEL TRANSFORMADOR

Factores	Observación	Valor	Puntos
Toma de fuerza, condiciones de puesta en servicio	La operación de las motobombas es normal y inicia su proceso sin complicaciones	10	9
Conversión de energía y condiciones externas, luego de poner a funcionar el equipo	La conversión de energía es buena ya que cumple un ciclo simple que es de energía eléctrica a energía mecánica y luego transformándola a energía hidráulica, mas las pérdidas	10	9
Transmisión de poder	La transmisión es directa desde el motor hacia la bomba	10	10
Cimentaciones, carcasa, y soportes	El anclaje es relativamente bueno y las carcasas se protegen de la corrosión con recubrimientos plásticos o pinturas	5	4
Controles, sensores, e instrumentación	Son tipo electromecánico y algunos electrónicos	5	3
Total		40	35

5.2.2. Pruebas y mediciones.

TABLA XLVIII. MEDICIÓN ELÉCTRICA DE LAS MOTOBOMBAS DEL TRANSFORMADOR

	Variable de diseño	Variable medida	Desviación	
Corrientes Bomba 1	A : 4,13 A	4,7 A	+ 13,8 %	
	B : 4,13 A	4,7 A	+ 13,8 %	
	C : 4,13 A	4,7 A	+ 13,8 %	
Corrientes Bomba 2	A : 4,13 A	4,7 A	+ 13,8 %	
	B : 4,13 A	4,7 A	+ 13,8 %	
	C : 4,13 A	4,6 A	+ 11,38 %	
Aislamiento Bomba 1 Valor mínimo: 1,22 M Ω	Para 30 min A - T = 13 000 M Ω B - T = 13 000 M Ω C - T = 12 000 M Ω A - B = 30 000 M Ω B - C = 25 000 M Ω A - C = 30 000 M Ω	Para 60 min A - T = 13 500 M Ω B - T = 13 500 M Ω C - T = 13 000 M Ω A - B = 30 00 M Ω B - C = 30 00 M Ω A - C = 30 00 M Ω	Estado técnico Bueno Bueno Bueno Bueno Bueno Bueno	Desviación 0 % 0 % 0 % 0 % 0 % 0 %
Aislamiento Bomba 2 Valor mínimo: 1,22 M Ω	Para 30 min A - T = 12 000 M Ω B - T = 12 000 M Ω C - T = 14 500 M Ω A - B = 20 000 M Ω B - C = 30 000 M Ω A - C = 25 000 M Ω	Para 60 min A - T = 13 000 M Ω B - T = 13 500 M Ω C - T = 14 500 M Ω A - B = 30 00 M Ω B - C = 30 00 M Ω A - C = 30 00 M Ω	Estado técnico Bueno Bueno Bueno Bueno Bueno Bueno	Desviación 0 % 0 % 0 % 0 % 0 % 0 %

La desviación en las corrientes es 10% bajo el régimen, mientras que en el aislamiento la desviación es del 0% .

TABLA XLIX MEDICIÓN DE TEMPERATURA DE LAS MOTOBOMBAS DEL TRANSFORMADOR

Equipo	Posición	Valor Medido	Temperatura de operación de rodamientos. (Recomendación NTN)
Motobomba 1	Punto 1	34,7 °C	De 0°C a 60 °C
	Punto 2	34,3°C	De 0°C a 60 °C
Motobomba 2	Punto 1	37,2°C	De 0°C a 60 °C
	Punto 2	35,5°C	De 0°C a 60 °C

Los valores de temperatura están dentro de la temperatura de operación recomendada, por tanto la desviación es del 0%

TABLA L. MEDICIÓN DE VIBRACIONES DE LAS MOTOBOMBAS DEL TRANSFORMADOR

Motobomba 1.

Punto 1	Axial	Radial	Tangencial
Valor medido en mm/s	0,2	0,44	0,7
Valores promedios	0,06	0,1	0,2

Motobomba 2.

Punto 1	Axial	Radial	Tangencial
Valor medido en mm/s	0,2	0,5	0,7
Valores promedios	0,1	0,1	0,2

Se tomó como referencia los puntos mas altos de vibraciones para cada posición, en esta medición no se registró fallas, por lo que el estado técnico es bueno de tal forma que el porcentaje de desviación es 0 % .

**TABLA LI. PUNTAJE CORRESPONDIENTES A LAS MEDICIONES DE LAS
MOTOBOMBAS DEL TRANSFORMADOR**

Condiciones	Puntos	Medición de corrientes	Medición de aislamiento	Medición de temperatura	Medición de vibraciones
Normales	30		X	X	X
5 % bajo o sobre el régimen.	28				
10 % bajo o sobre el régimen.	20	X			
20 % bajo o sobre el régimen.	15				
25 % bajo o sobre el régimen.	0				

El puntaje promedio es de 27,5 puntos .

5.2.3. Edad.

Estos equipos deben responder satisfactoriamente al sistema de enfriamiento del aceite del transformador, por lo que no pueden exceder en cuanto a su vida útil.

TABLA LII. PUNTAJE CORRESPONDIENTES A LA EDAD DE LAS MOTOBOMBAS DEL TRANSFORMADOR

A ñ o s	P u n t o s	
0 - 2	10	
3 - 12	9	X
13 -15 .	8	
16 -20	7	
M á s de 20	6	

5.2.4. Medio ambiente.

TABLA LIII. PUNTAJE CORRESPONDIENTES AL MEDIO AMBIENTE DE LAS MOTOBOMBAS DEL TRANSFORMADOR

Medio ambiente	Puntos	
Limpio y seco	10	X
Caliente	9	X
Humedad	8	
Polvoriento	7	
Vapor corrosivo	6	

Por lo que se tiene un puntaje de 9,5.

5.2.5. Ciclo de trabajo.

Estos equipos operan alternadamente 15 días la motobomba 1 y 15 días la motobomba 2, es decir el 50% de la jornada del mes, pero operan en un proceso continuo.

TABLA LIV. PUNTAJE CORRESPONDIENTES AL CICLO DE TRABAJO DE LAS MOTOBOMBAS DEL TRANSFORMADOR

Ciclo de trabajo	Puntos	
Dentro de la temperatura y carga	10	
Trabajo a corto tiempo	9	
Trabajo Continuo	8	X
Carga Media	7	X
Carga Fuerte	6	

Por lo que el puntaje es de 7,5.

5.2.6. Resultados.

TABLA LV. PUNTAJE CORRESPONDIENTES A LA FIABILIDAD PRÁCTICA DE LAS MOTOBOMBAS DEL TRANSFORMADOR

Inspección Visual	35
Pruebas y Mediciones	27,5
Edad	9
Medio Ambiente	9,5
Ciclo de Trabajo	7,5
Total de puntos %	88,5

- Probabilidad de trabajo sin fallo $R(t) = 88,5\%$
- Probabilidad de fallo $F(t) = 11,5\%$.

Según este resultado las motobombas 1 y 2 del sistema de enfriamiento del transformador están dentro del parámetro óptimo de fiabilidad.

5.3. Cálculo de fiabilidad de la motobomba de Frenos y gatos.

5.3.1. Inspección visual.

TABLA LVI. INSPECCIÓN VISUAL DE LA MOTOBOMBA DE FRENOS Y GATOS

Factores	Observación	Valor	Puntos
Toma de Fuerza, condiciones de puesta en servicio	Arranca sin problemas	10	10
Conversión de energía y condiciones externas, luego de poner a funcionar el equipo	No tiene muchas etapas de transformación de energía lo que significa pocas pérdidas, el ambiente es seco y protegido contra polvo	10	9
Transmisión de poder	La transmisión es directa desde el motor hacia la bomba	10	10
Cimentaciones, carcasa, y soportes	Está anclada a los soportes de la unidad de generación, la carcasa se encuentra mantenida y bien sujeta	5	4
Controles, Sensores, e instrumentación	Son tipo electromecánico	5	3
Total		40	36

5.3.2. Pruebas y mediciones.

TABLA LVII. MEDICIÓN ELÉCTRICA DE LA MOTOBOMBA DE FRENOS Y GATOS

Pruebas y mediciones eléctricas.	Variable de diseño	Variable medida	Desviación	
Corrientes	A = 3 A	3,1 A	+ 3,33 %	
	B = 3 A	3,2 A	+ 6,66 %	
	C = 3 A	3,1 A	+ 3,33 %	
Aislamiento	Para 30 min	Para 60 min	Estado técnico	Desviación
Valor mínimo: 1,22 M Ω	A - T = 5 300 M Ω	A - T = 8 120 M Ω	Bueno	0 %
	B - T = 7 100 M Ω	B - T = 10 500 M Ω	Bueno	0 %
	C - T = 6 600 M Ω	C - T = 10 000 M Ω	Bueno	0 %
	A - B = 174 M Ω	A - B = 177 M Ω	Bueno	0 %
	B - C = 256 M Ω	B - C = 265 M Ω	Bueno	0 %
	A - C = 268 M Ω	A - C = 272 M Ω	Bueno	0 %

TABLA LVIII. MEDICIÓN DE VIBRACIONES DE LA MOTOBOMBA DE FRENOS Y GATOS

Vibraciones	Variable promedio	Variable medida	Desviación
	103 VdB en 1X T	120 VdB	+ 16,5 %
	107,2 VdB en 1X R	117 VdB	+ 9,14 %
	107,3 VdB en 1X T	108 VdB	+ 0,65 %

La desviación de pruebas eléctricas para corrientes es de 4,44 % , mientras que para el aislamiento es del 0 % , mientras que la desviación de la medida de vibraciones es de +8,76 % .

TABLA LIX. PUNTAJE CORRESPONDIENTES LAS PRUEBAS Y MEDICIONES DE LA MOTOBOMBA DE FRENOS Y GATOS

Condiciones	Puntos	Medición de corrientes	Medición de aislamiento	Medición de vibraciones
Normales	30		X	
5 % bajo o sobre el régimen.	28	X		
10 % bajo o sobre el régimen.	20			X
25 % bajo o sobre el régimen.	0			

El puntaje promedio correspondiente es 26.

5.3.3. Edad.

TABLA LX. PUNTAJE CORRESPONDIENTE A LA EDAD DE LA MOTOBOMBA DE FRENOS Y GATOS

Años	Puntos	
0 - 2	10	
3 - 12	9	X
13 - 15.	8	
16 - 20	7	
Más de 20	6	

5.3.4. Medio ambiente.

Esta motobomba al estar junto al generador opera a alta temperatura y el ambiente es seco, al mismo tiempo esta cubierta por los escudos de la parte superior del generador, lo que le protege del polvo.

TABLA LXI. PUNTAJE CORRESPONDIENTE AL MEDIO AMBIENTE DE LA MOTOBOMBA DE FRENOS Y GATOS

Medio ambiente	Puntos	
Limpio y seco	10	X
Caliente sobre los 55 °C	9	X
Humedad	8	
Polvoriento	7	
Vapor corrosivo	6	

El puntaje promedio correspondiente es de 9,5.

5.3.5. Ciclo de trabajo.

Este equipo solo interviene en el arranque y la parada del generador y posteriormente se desactiva.

TABLA LXII. PUNTAJE CORRESPONDIENTE A LA EDAD DE LA MOTOBOMBA DE FRENOS Y GATOS

Ciclo de trabajo	Puntos	
Dentro de la temperatura y carga	10	
Trabajo a corto tiempo	9	X
Trabajo continuo	8	
Carga media	7	
Carga fuerte	6	

5.3.6. Resultados.

TABLA LXIII. PUNTAJE CORRESPONDIENTE A LA FIABILIDAD PRÁCTICA DE LA MOTOBOMBA DE FRENOS Y GATOS

Inspección Visual	36
Pruebas y Mediciones	26
Edad	9
Medio Ambiente	9,5
Ciclo de Trabajo	9
Total de puntos %	89,5

- Probabilidad de trabajo sin fallo $R(t) = 89,5\%$
- Probabilidad de fallo $F(t) = 10,5\%$

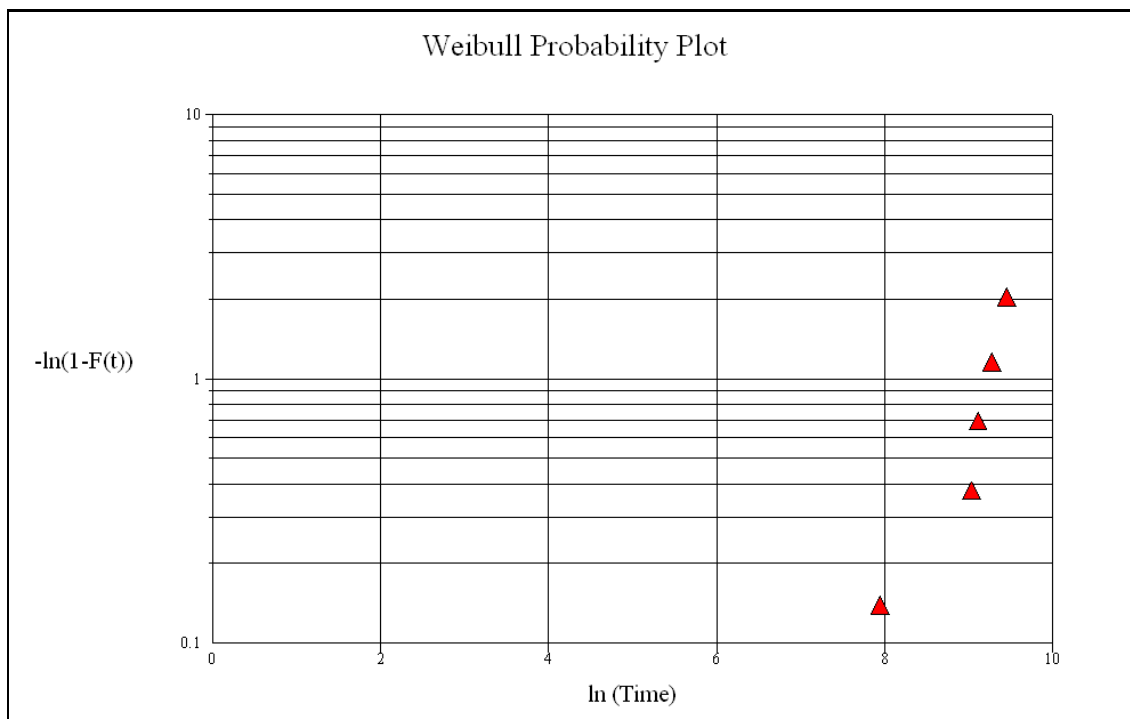
El equipo es técnicamente fiable.

5.4. Índices de fiabilidad de las motobombas y motocompresor de acumulación y bombeo.

5.4.1. Motobomba 1.

Fechas de fallos Tiempo entre fallas en horas

14/09/2001	12788.49
05/12/2003	8368.36
19/05/2005	10617.75
24/03/2007	9013.29
15/10/2008	2815.67
11/04/2009	



Resultados: $\beta = 1.63$ $\eta = 10538.83$ horas M T T F = 9443.44 horas

- Cálculo de la fiabilidad y tasa de fallas para el tiempo de vida característica y tiempo medio entre fallas.

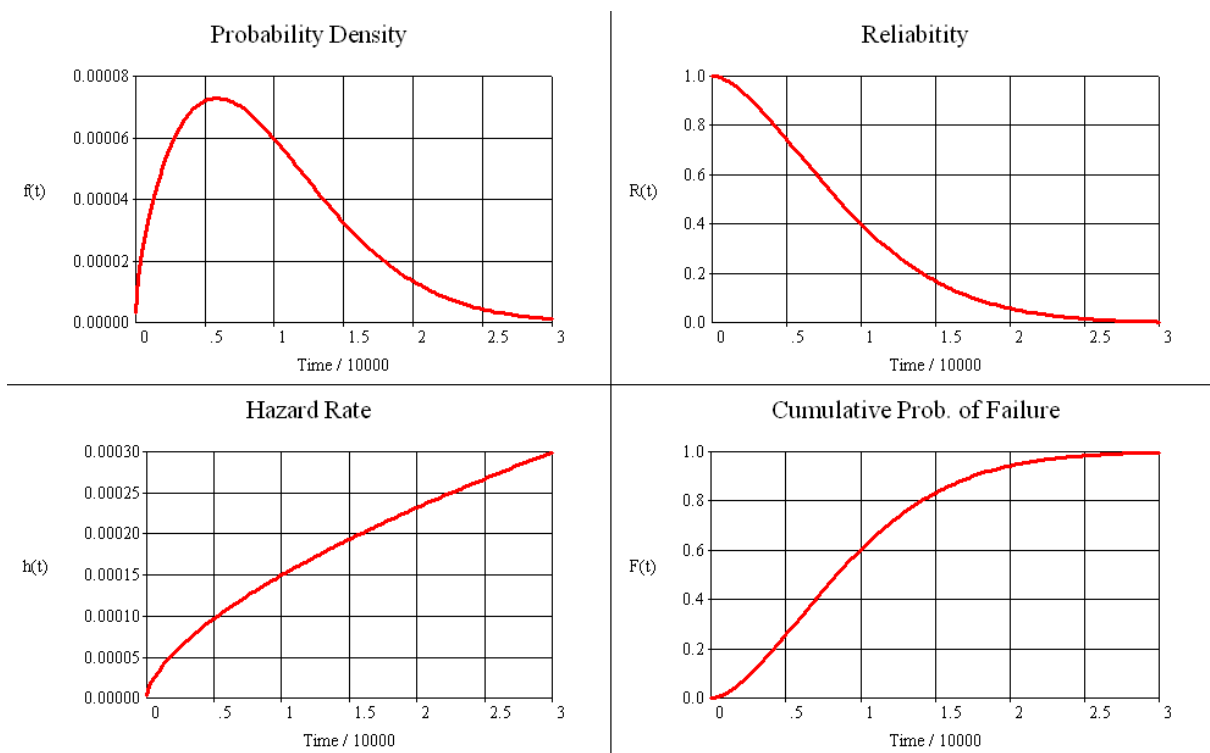
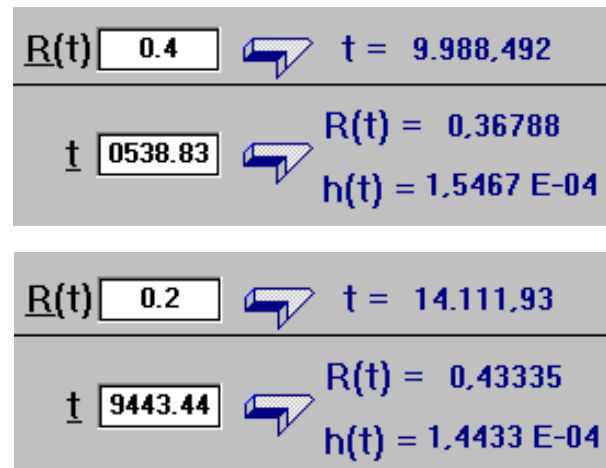
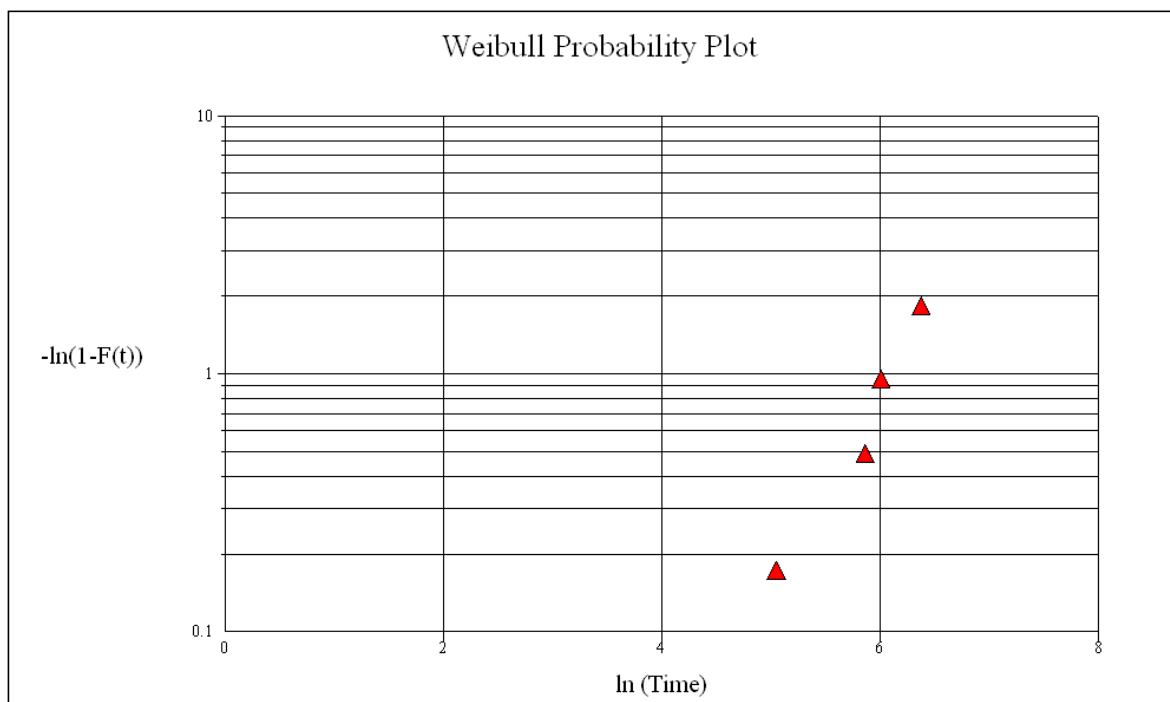


Figura 29. Índices de fiabilidad en función del tiempo de la motobomba 1 del sistema de

acumulación y bombeo

5.4.2. M o t o b o m b a 2.

Fechas de fallos	Tiempo entre fallas en horas
12/04/2001	2453.88
14/09/2001	9233.51
23/04/2003	6402.11
02/06/2004	5536.96
19/05/2005	



Resultados: $\beta = 1.76$ $\eta = 6979.98$ horas M T T F = 6213.77 horas.

- Cálculo de la fiabilidad y tasa de fallas para el tiempo de vida característica y tiempo medio entre fallas.

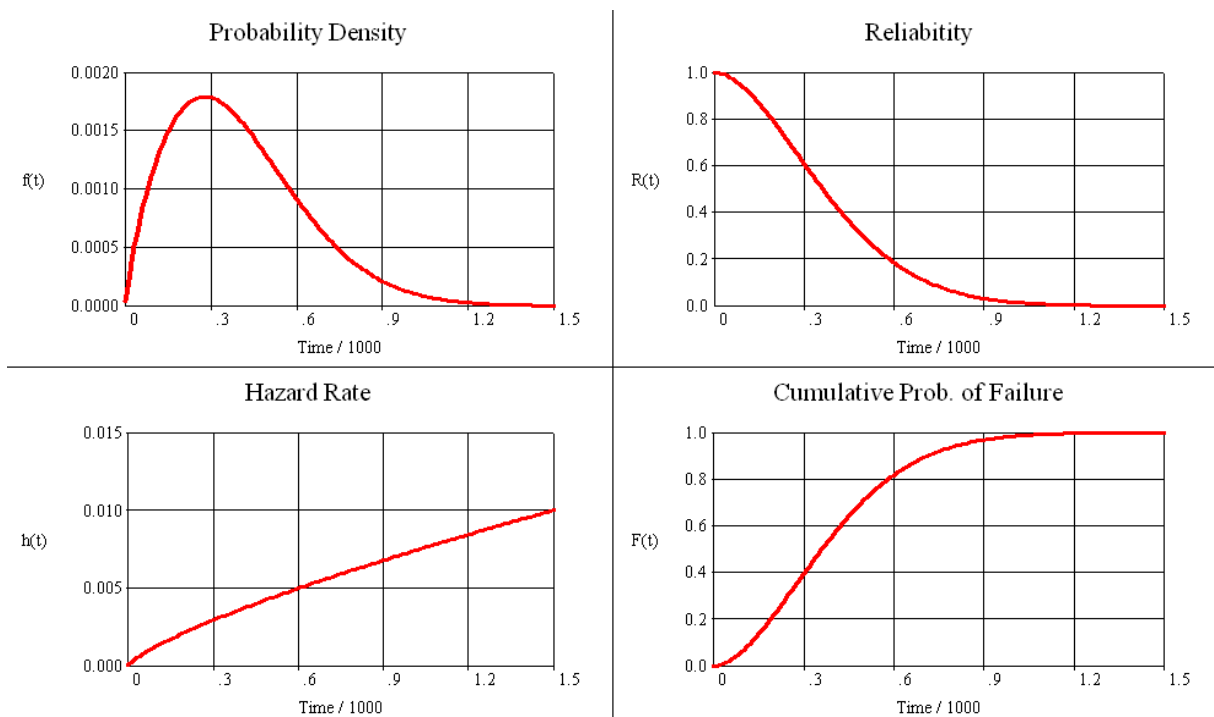
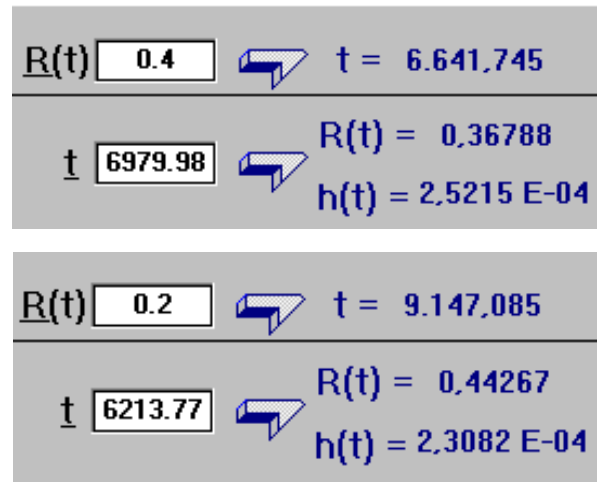
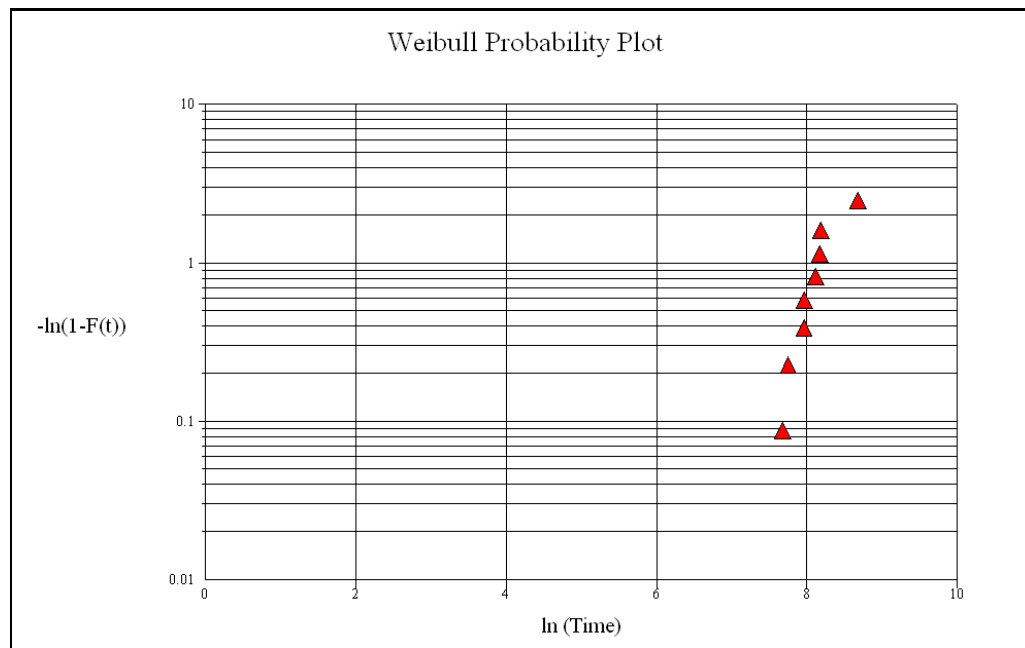


Figura 30. Índices de fiabilidad en función del tiempo de la motobomba 2 del sistema de acumulación y bombeo

5.4.3. Motocompresor.

Fechas de fallos Tiempo entre fallas en horas

12/04/2001	5867.29
18/04/2002	2328.04
12/09/2002	3523.52
23/04/2003	3570.71
05/12/2003	2878.59
04/06/2004	2155.01
18/10/2004	3366.22
19/05/2005	2862.86
16/11/2005	



Resultados: $\beta = 3.23$ $\eta = 3719.98$ horas M T T F = 3333.44 horas.

- Cálculo de la fiabilidad y tasa de fallas para el tiempo de vida característica y tiempo medio entre fallas.

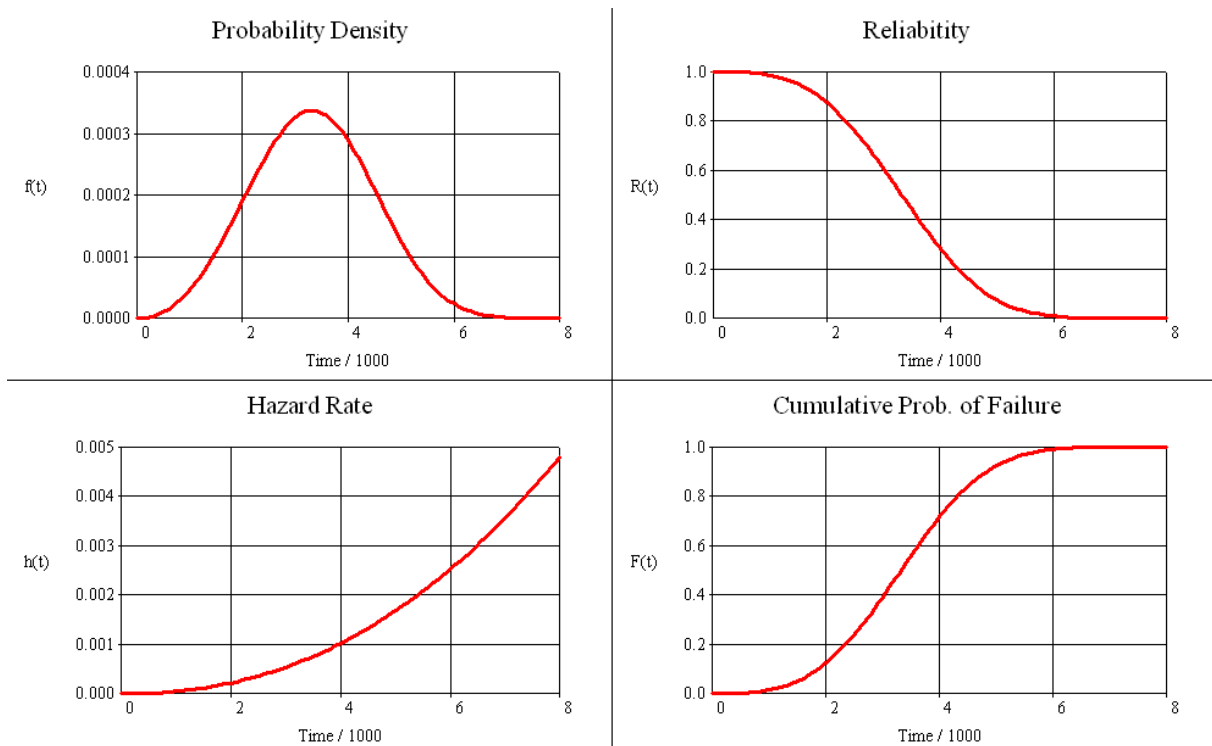
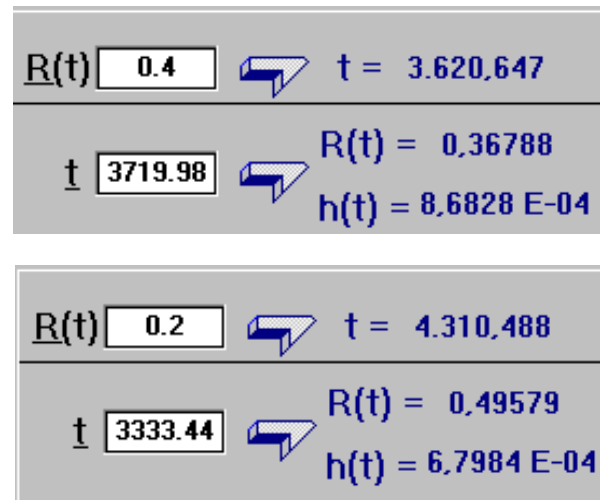


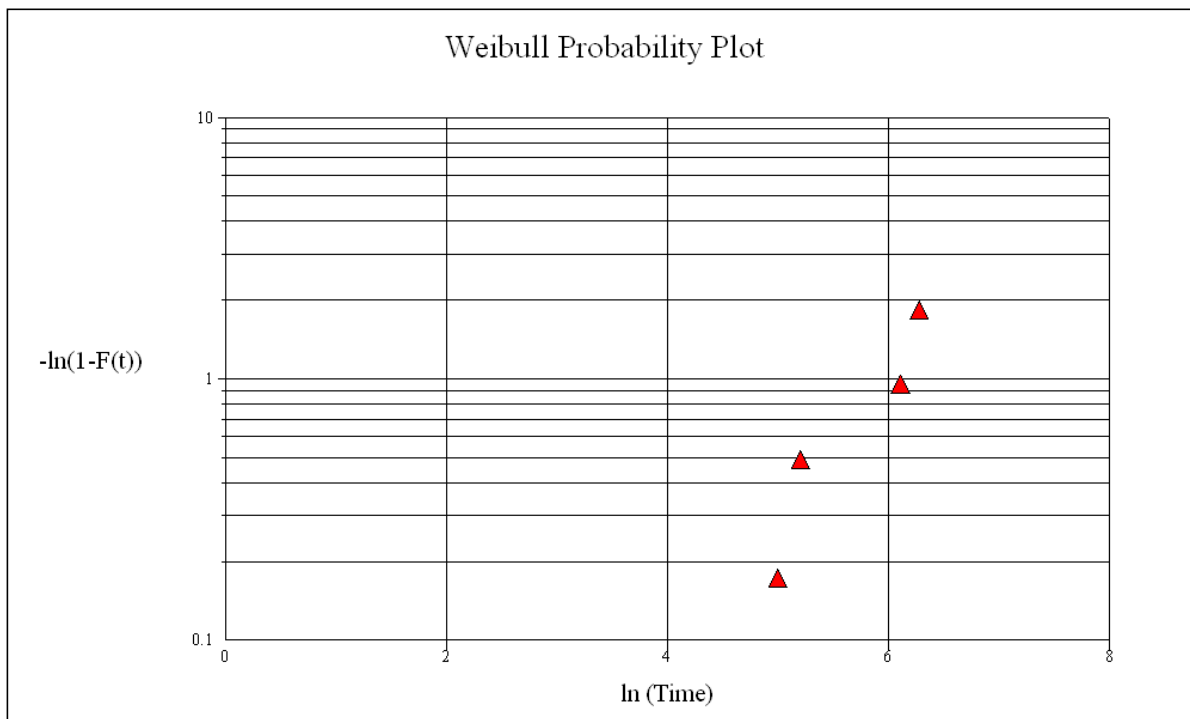
Figura 31. Índices de fiabilidad en función del tiempo del motocompresor del sistema de acumulación y bombeo

5.5. Índices de fiabilidad de las motobombas de agua de enfriamiento.

5.5.1. Motobomba 1.

Fechas de fallos Tiempo entre fallas en horas

18/04/2002	2328.04
12/09/2002	7078.50
05/12/2003	8368.36
19/05/2005	2862.86
16/11/2005	



Resultados: $\beta = 1,48$ $\eta = 6158.17$ horas M T T F = 5569.40 horas.

- Cálculo de la fiabilidad y tasa de fallas para el tiempo de vida característica y tiempo medio entre fallas.

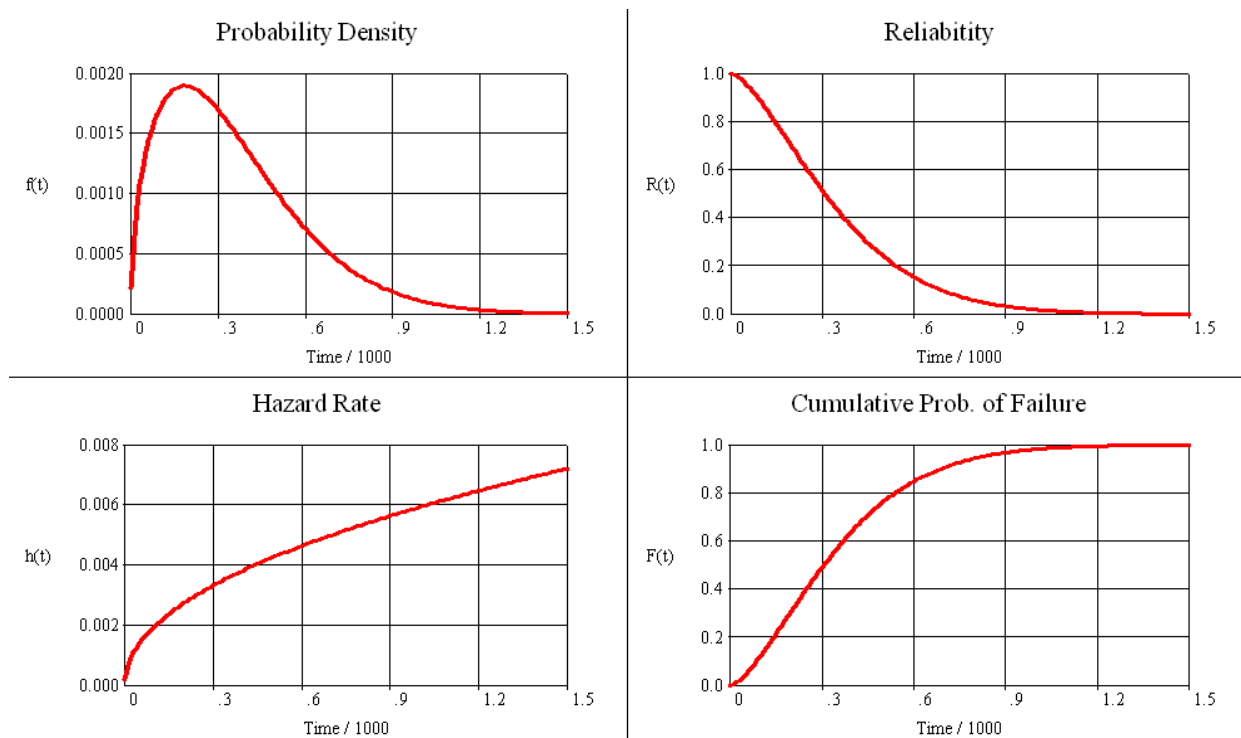
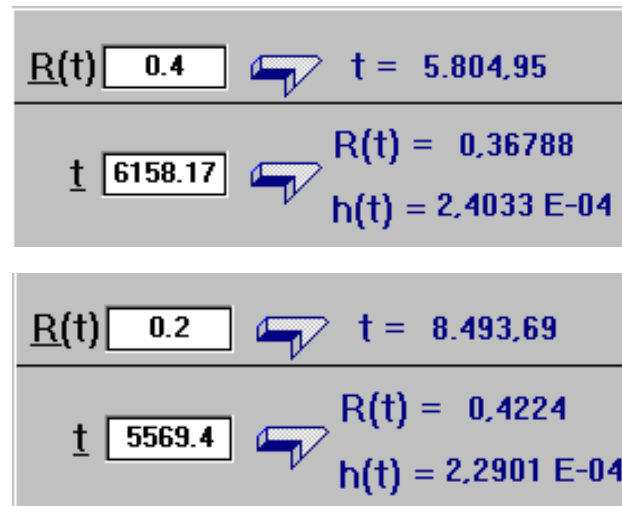
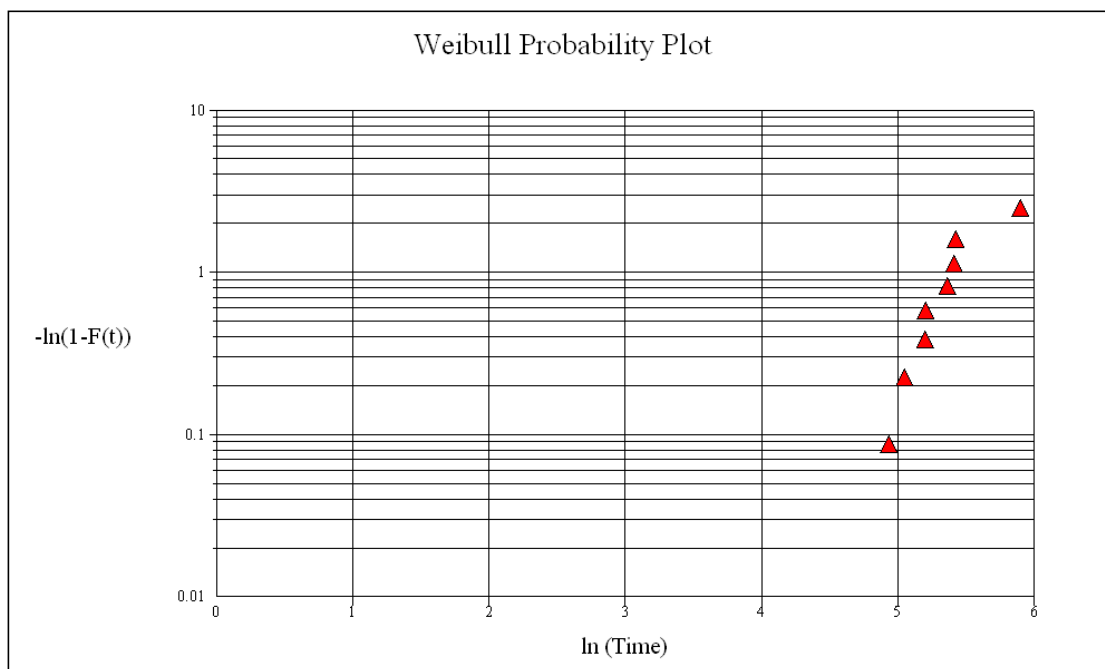


Figura 32. Índices de fiabilidad en función del tiempo de la motobomba 1 del sistema de agua de enfriamiento

5.5.2. Motobomba de refuerzo 1.

Fechas de fallos Tiempo entre fallas en horas

12/04/2001	2453.88
14/09/2001	5725.72
12/09/2002	3523.52
23/04/2003	3570.71
05/12/2003	2847.13
02/06/2004	2186.47
18/10/2004	3366.22
19/05/2005	2862.86
16/11/2005	



Resultados: $\beta = 3.41$ $\eta = 3703.52$ horas M T T F = 3327.81 horas.

- Cálculo de la fiabilidad y tasa de fallas para el tiempo de vida característica y tiempo promedio entre fallas.

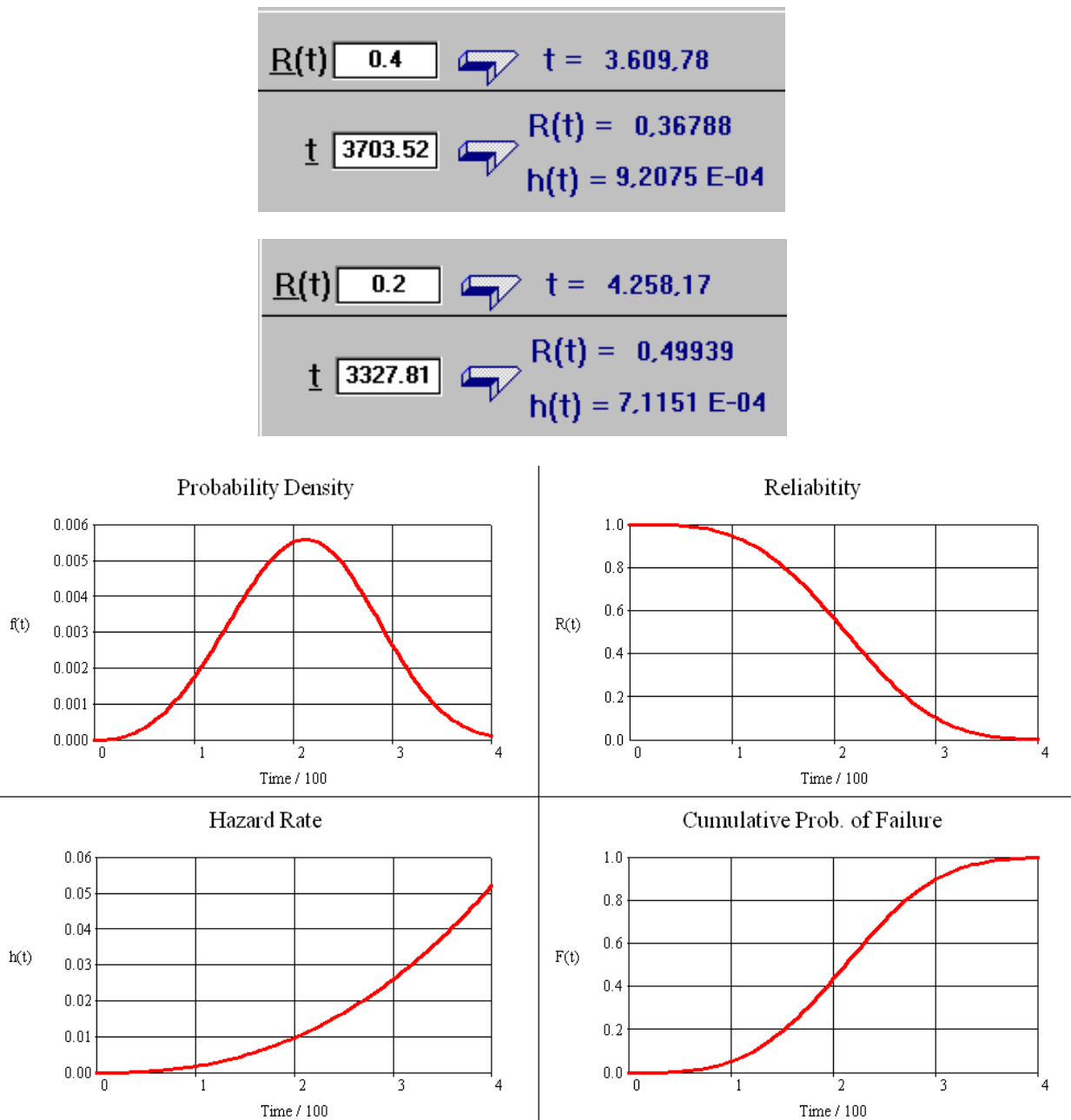
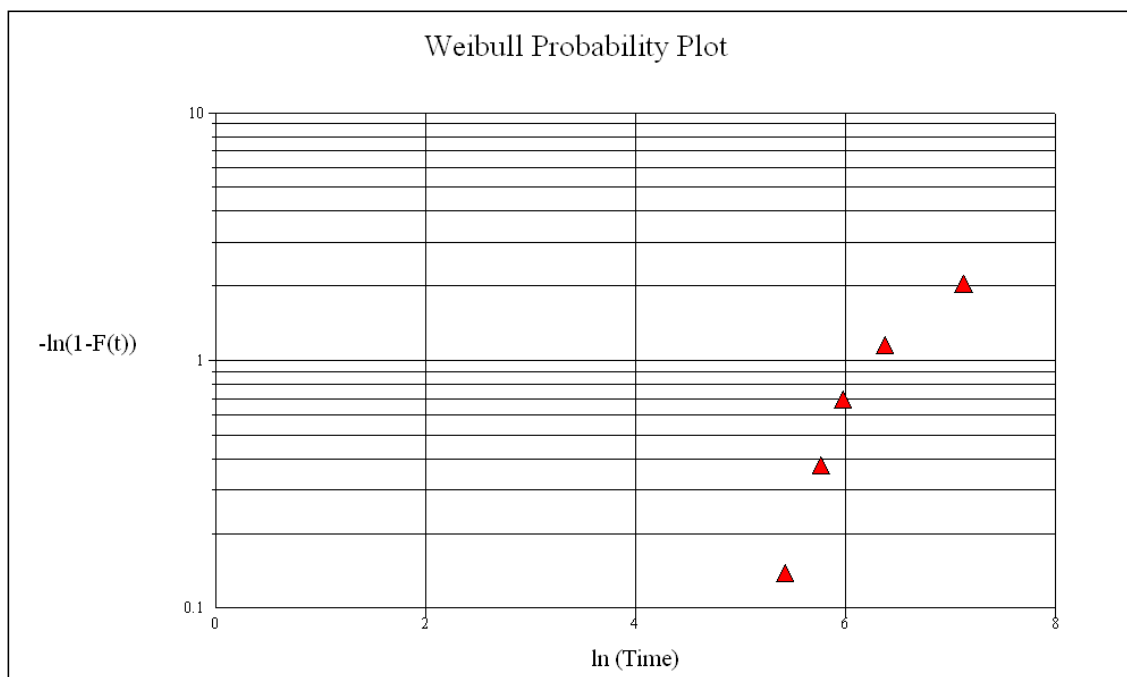


Figura 33. Índices de fiabilidad en función del tiempo de la motobomba de refuerzo 1 del sistema de agua de enfriamiento

5.5.3. M o t o b o m b a 2.

Fechas de fallos Tiempo entre fallas en horas

14/09/2001	9233.51
23/04/2003	3570.71
05/12/2003	5017.87
18/10/2004	6213.35
16/11/2005	19552.39
11/04/2009	



Resultados: $\beta = 1.5$ $\eta = 10059.85$ horas $M T T F = 9080.21$ horas

- Cálculo de la fiabilidad y tasa de fallas para el tiempo de vida característica y tiempo medio entre fallas.

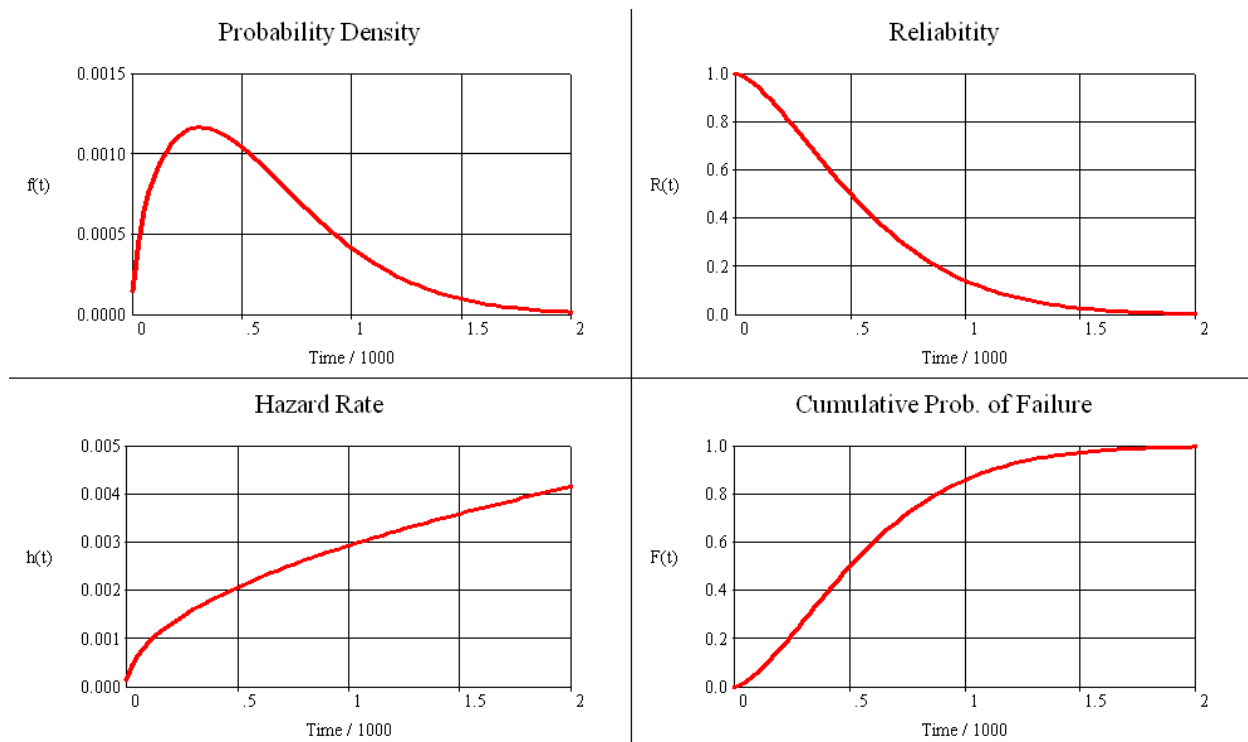
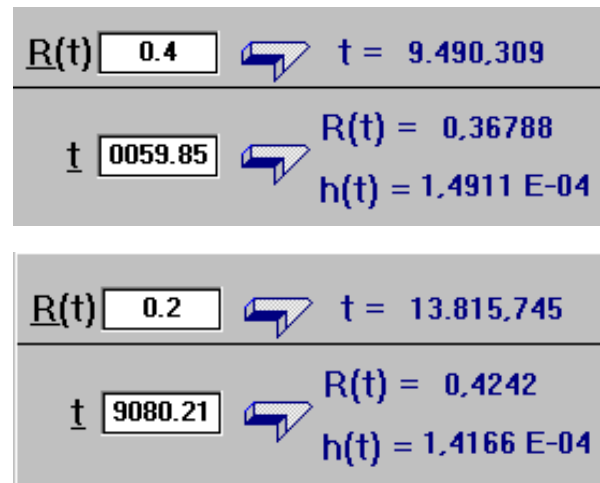
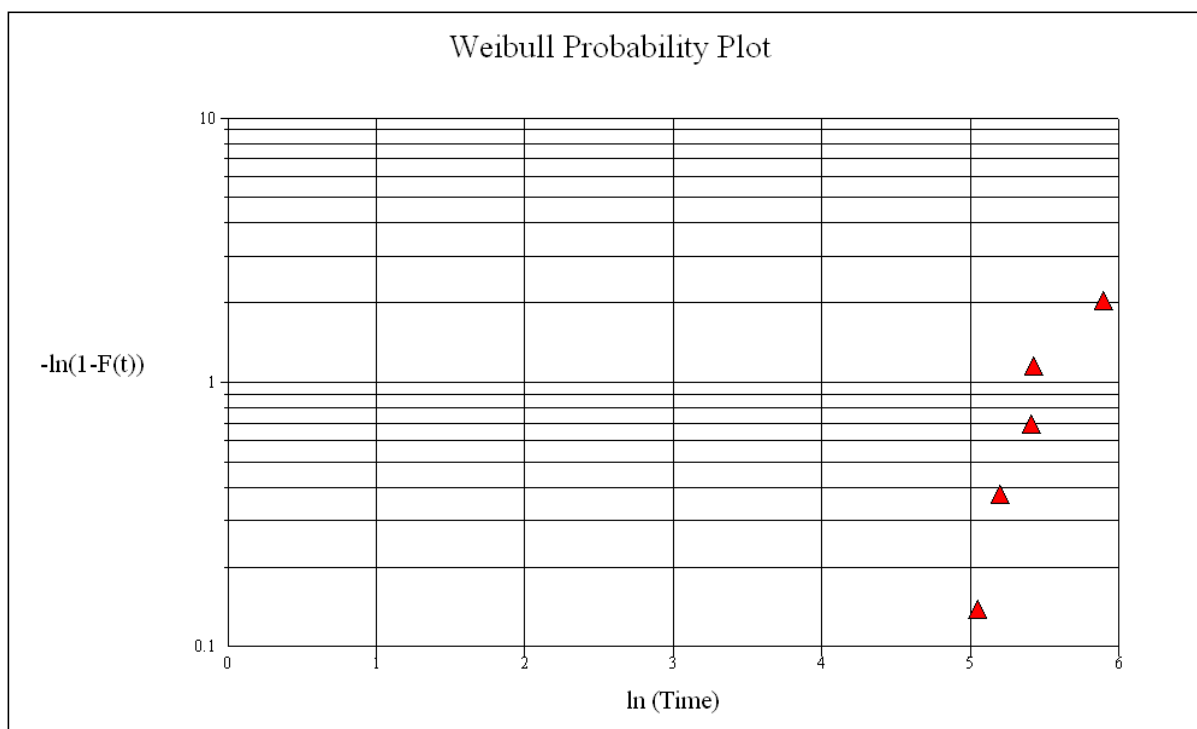


Figura 34. Índices de fiabilidad en función del tiempo de la motobomba 2 del sistema de agua de enfriamiento

5.5.4. Motobomba de refuerzo 2.

Fechas de fallos Tiempo entre fallas en horas

12/04/2001	2453.88
14/09/2001	5725.72
12/09/2002	3523.52
23/04/2003	3570.71
05/12/2003	2847.13
02/06/2004	



Resultados: $\beta = 3$ $\eta = 4087.27$ horas $MTTF = 3649.83$ horas

- Cálculo de la fiabilidad y tasa de fallas para el tiempo de vida característica y tiempo medio entre fallas.

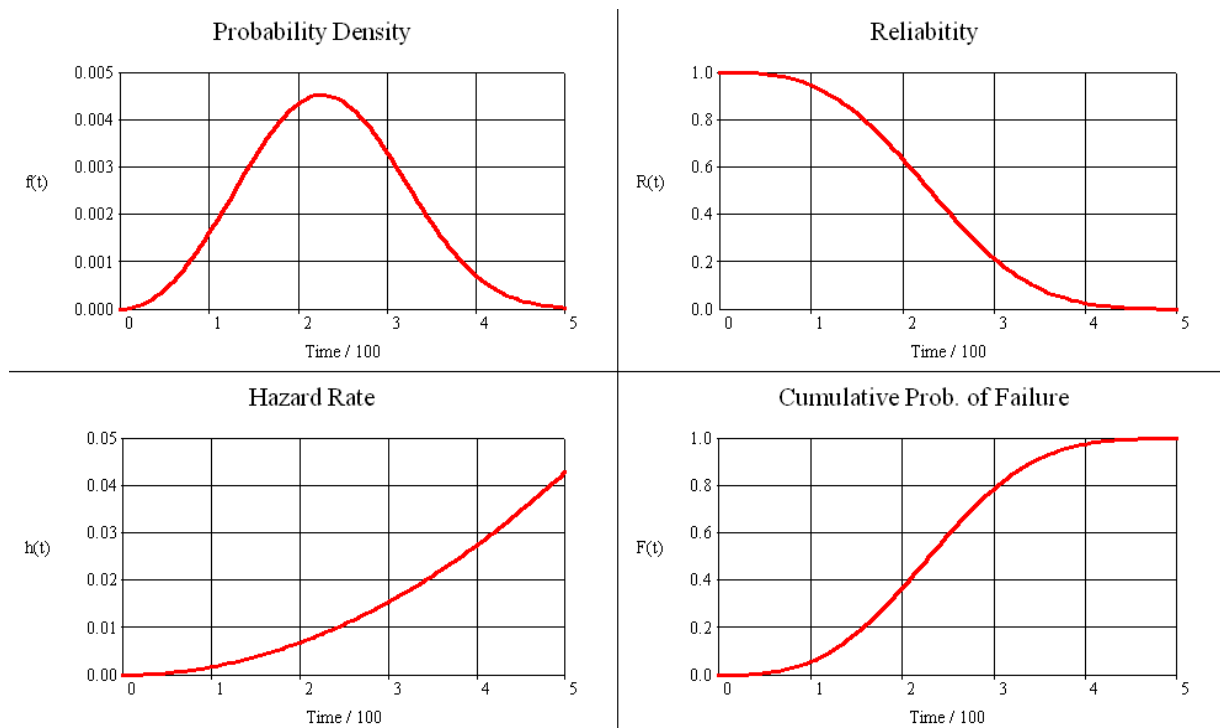
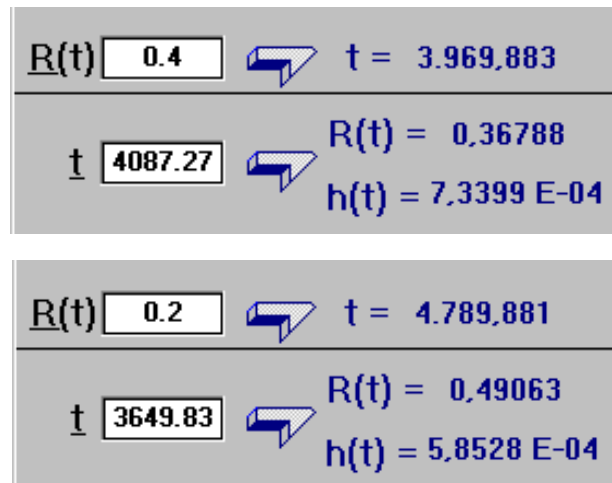
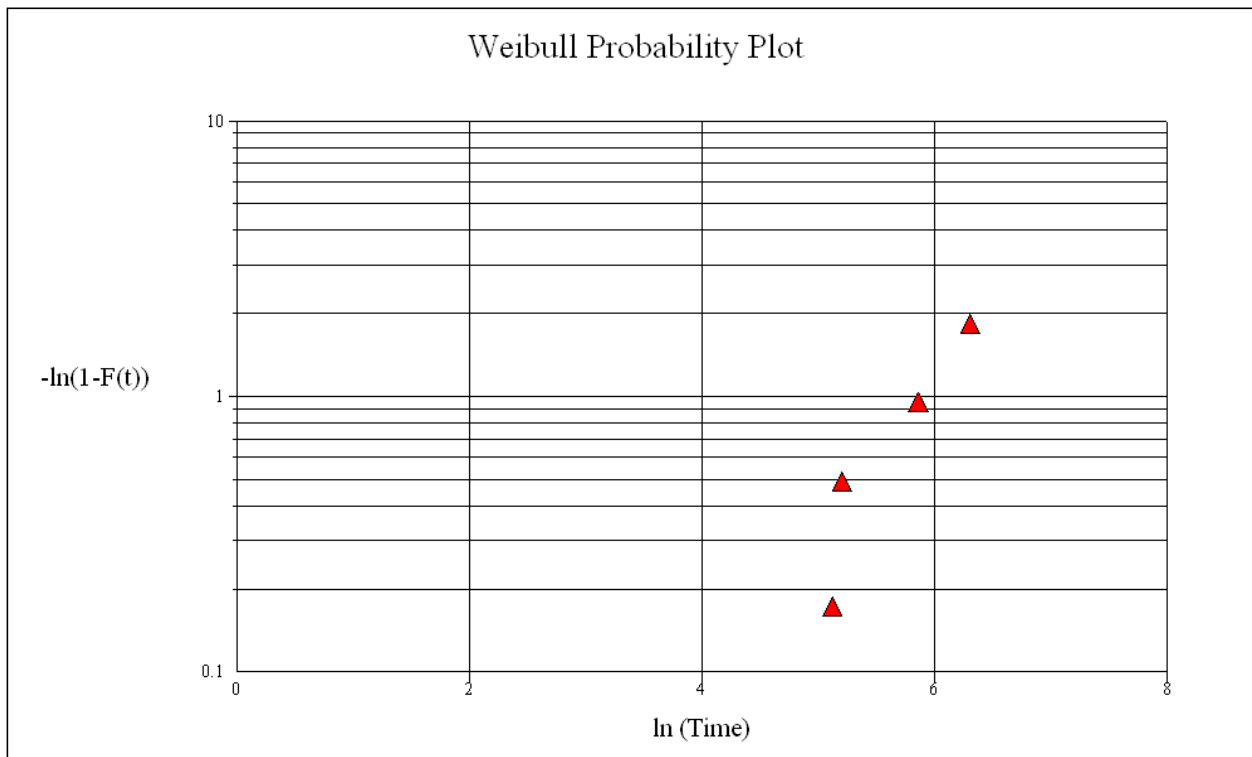


Figura 35. Índices de fiabilidad en función del tiempo de la motobomba de refuerzo 2 del sistema de agua de enfriamiento

5.6. Índices de fiabilidad de la motobomba de alta presión.

5.6.1. Motobomba.

Fechas de fallos	Tiempo entre fallas en horas
16/11/2005	8620.04
17/05/2007	2642.64
31/10/2007	5521.23
15/10/2008	2862.86
14/04/2009	



Resultados: $\beta = 1.67$ $\eta = 5801.57$ horas $M T T F = 5186.65$ horas

- Cálculo de la fiabilidad y tasa de fallas para el tiempo de vida característica y tiempo medio entre fallas.

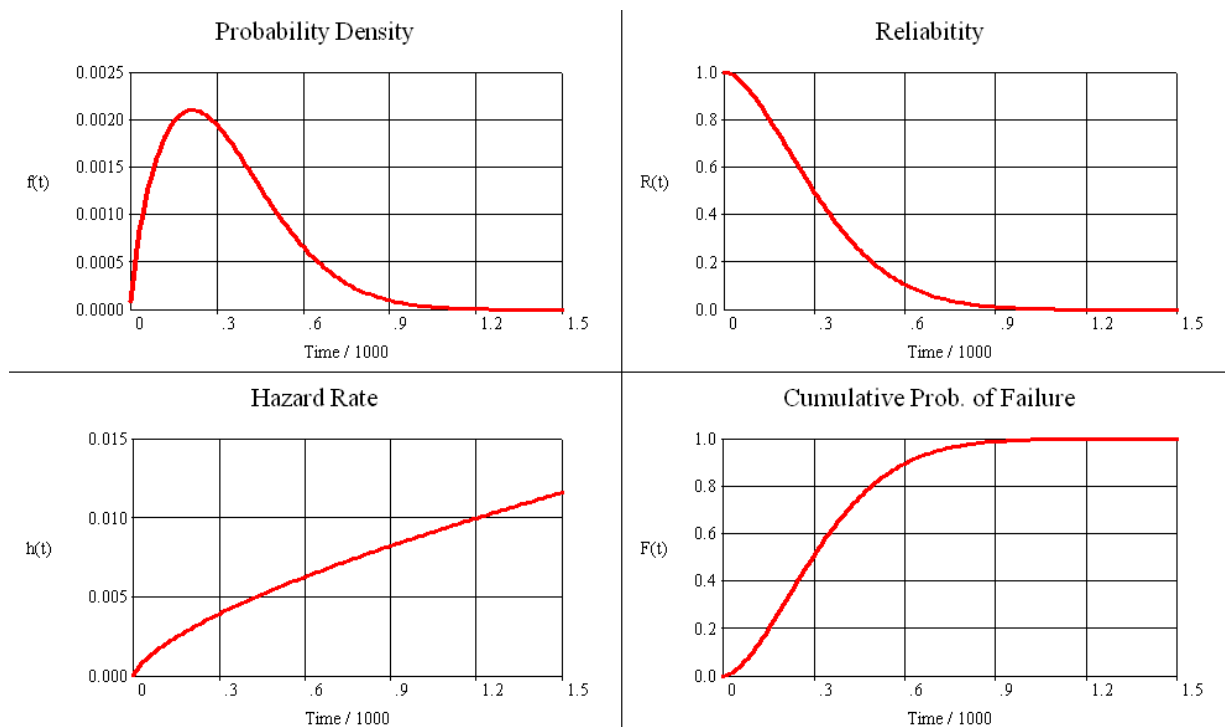
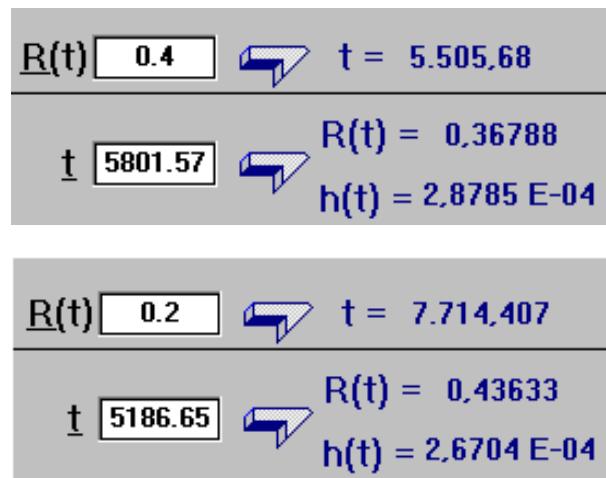


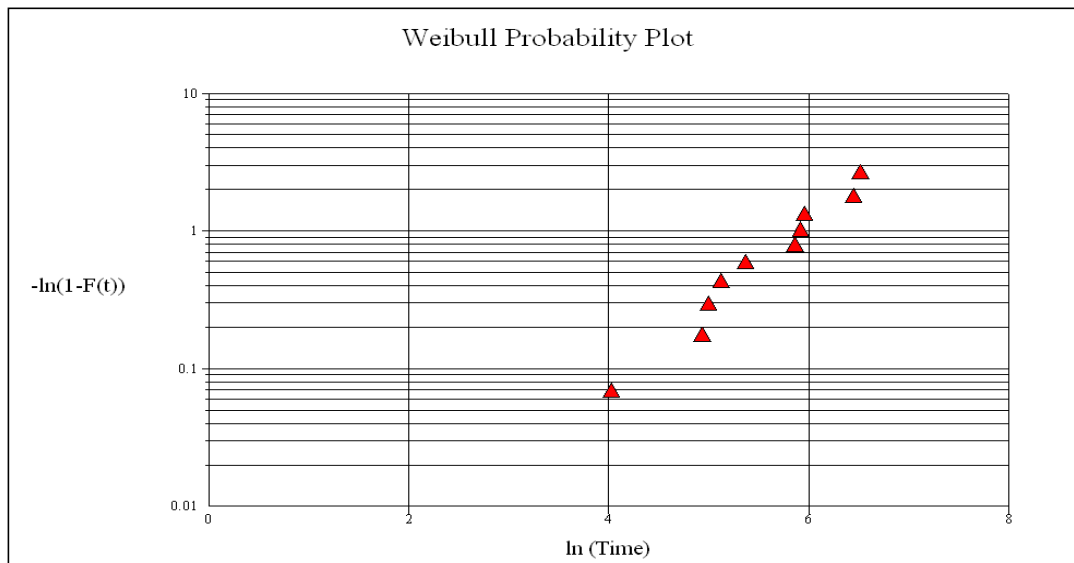
Figura 36. Índices de fiabilidad en función del tiempo de la motobomba del sistema de alta presión

5.7. Índices de fiabilidad de los ventiladores del sistema de ventilación.

5.7.1. Ventilador B.

Fechas de fallos Tiempo entre fallas en horas

12/04/2001	
	5851.56
18/04/2002	
	2296.58
12/09/2002	
	9909.90
02/06/2004	
	2186.47
18/10/2004	
	3366.22
19/05/2005	
	10633.48
25/03/2007	
	880.88
17/05/2007	
	2642.64
31/10/2007	
	5521.23
15/10/2008	
	6071.78
04/11/2009	



Resultados: $\beta = 1.42$ $\eta = 5642.24$ horas M T T F = 5130.5 horas

- Cálculo de la fiabilidad y tasa de fallas para el tiempo de vida característica y tiempo medio entre fallas.

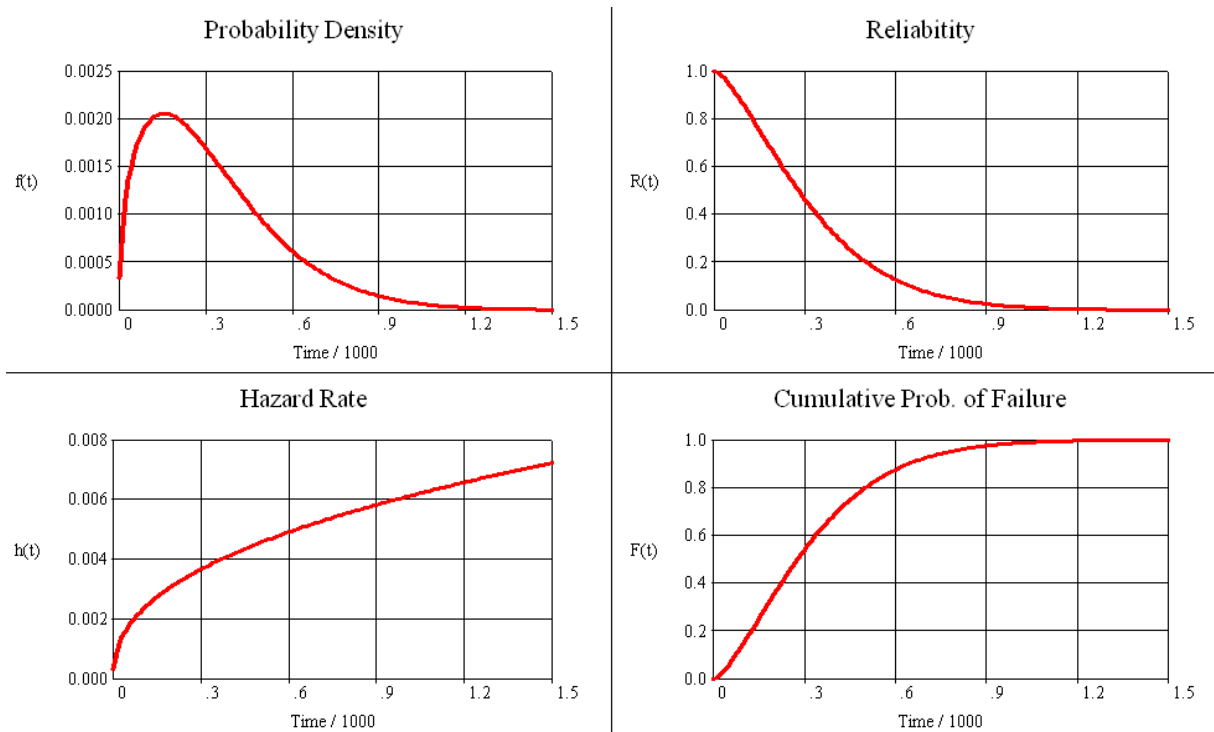
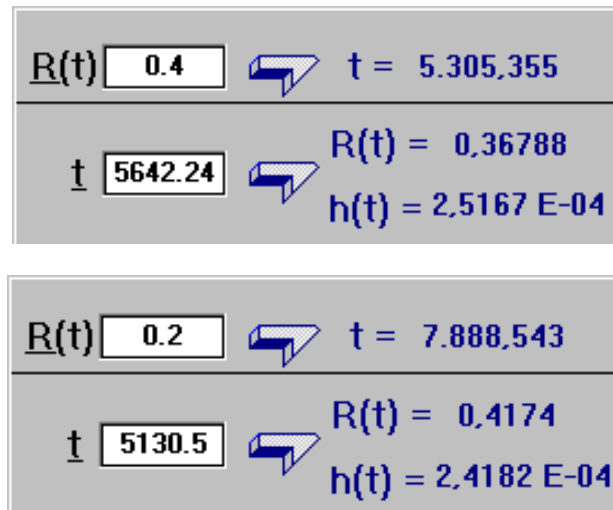


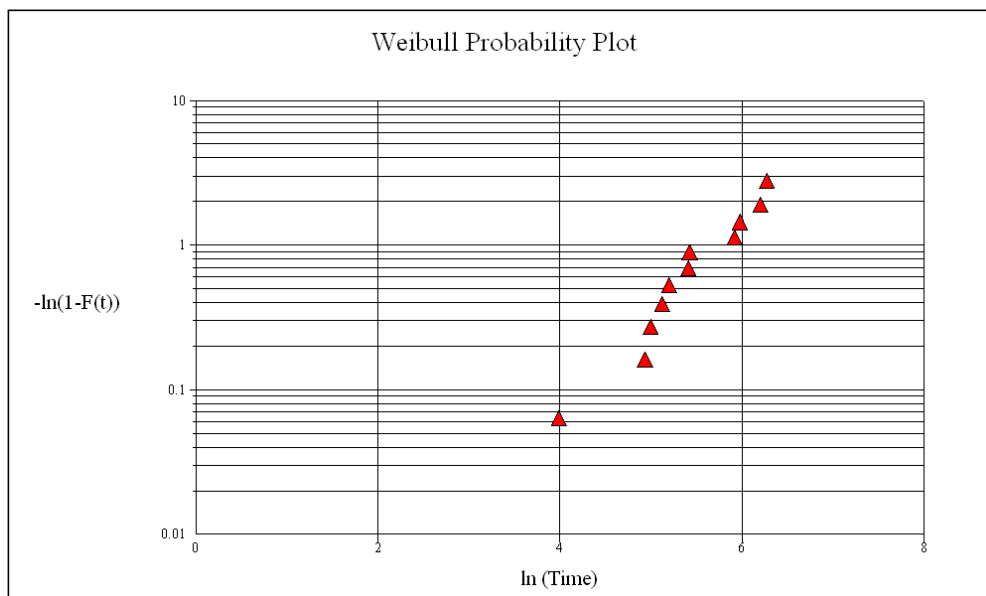
Figura 37. Índices de fiabilidad en función del tiempo del ventilador B del sistema de

ventilación

5.7.2. VentiladorC.

Fechas de fallos	Tiempo entre fallas en horas
------------------	------------------------------

12/04/2001	5851.56
18/04/2002	2328.04
12/09/2002	3523.52
23/04/2003	3570.71
05/12/2003	2847.13
02/06/2004	2186.47
18/10/2004	6213.35
16/11/2005	7786.35
25/03/2007	849.42
17/05/2007	2642.64
31/10/2007	8321.17
11/04/2009	



Resultados: $\beta = 1.64$ $\eta = 4828.37$ horas $M T T F = 4320.54$ horas

- Cálculo de la fiabilidad y tasa de fallas para el tiempo de vida característica y tiempo promedio entre fallas.

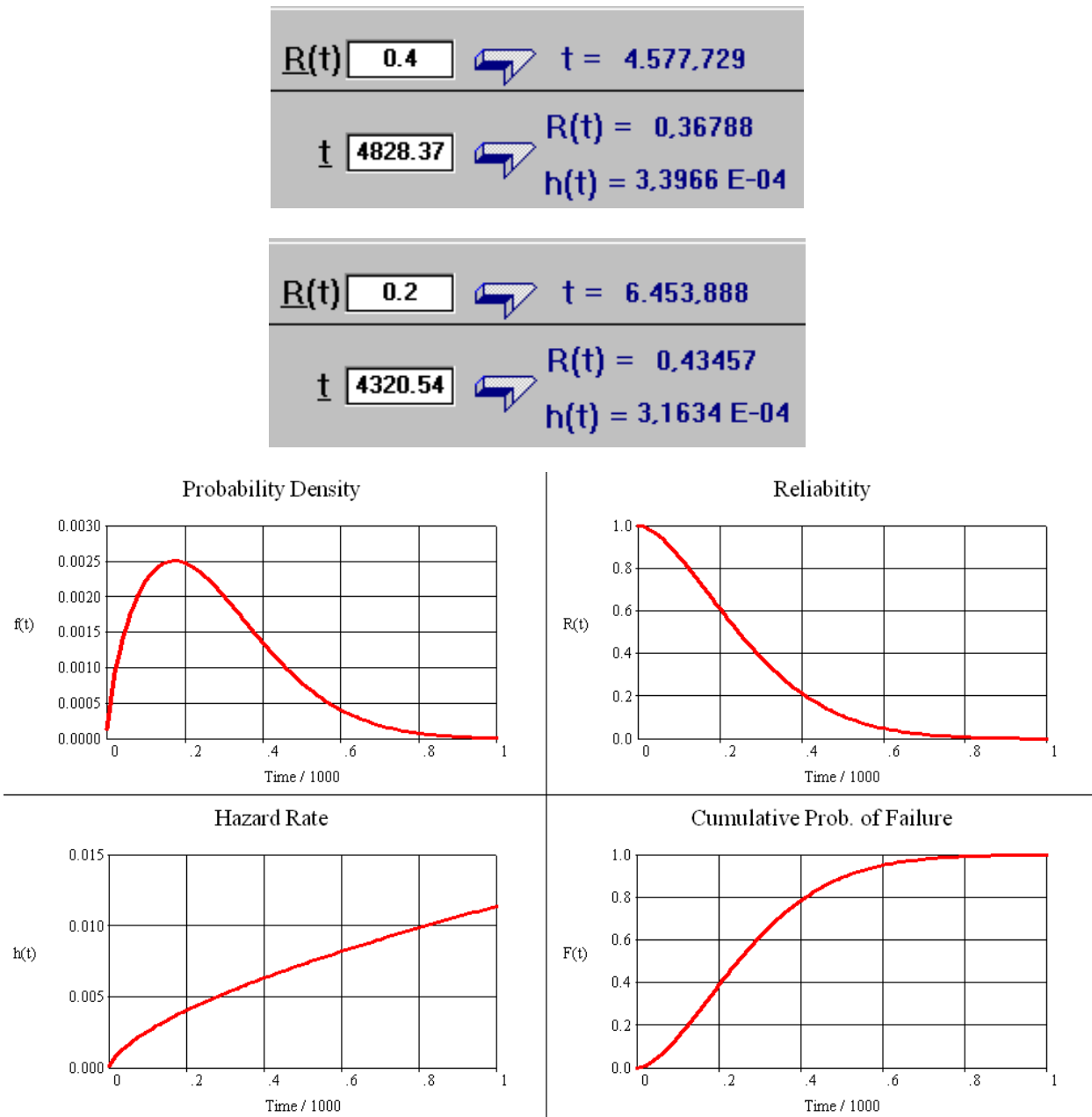
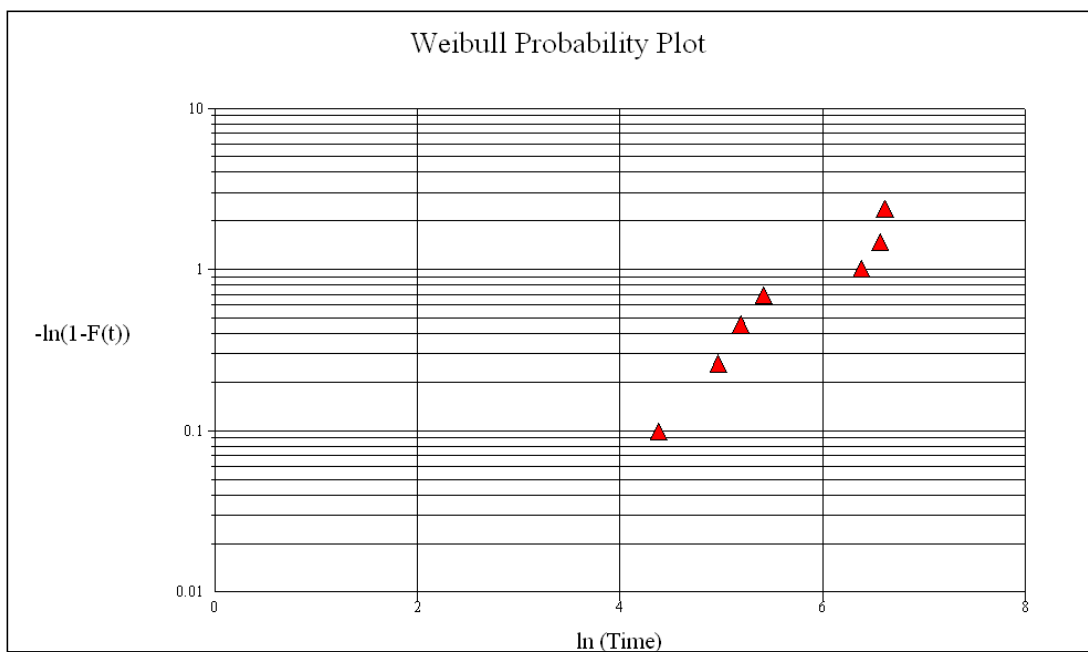


Figura 38. Índices de fiabilidad en función del tiempo del ventilador C del sistema de ventilación

5.8. Índices de fiabilidad de los ventiladores de excitación.

5.8.1. Ventilador E 42.

Fechas de fallos	Tiempo entre fallas en horas
14/09/2001	9280.70
26/04/2003	3539.25
06/12/2003	2831.40
02/06/2004	2265.12
23/10/2004	11718.85
06/11/2006	11215.49
18/10/2008	1258.40
05/01/2009	



Resultados: $\beta = 1.18$ $\eta = 6860.31$ horas $MTTF = 6486.39$ horas

- Cálculo de la fiabilidad y tasa de fallas para el tiempo de vida característica y tiempo promedio entre fallas.

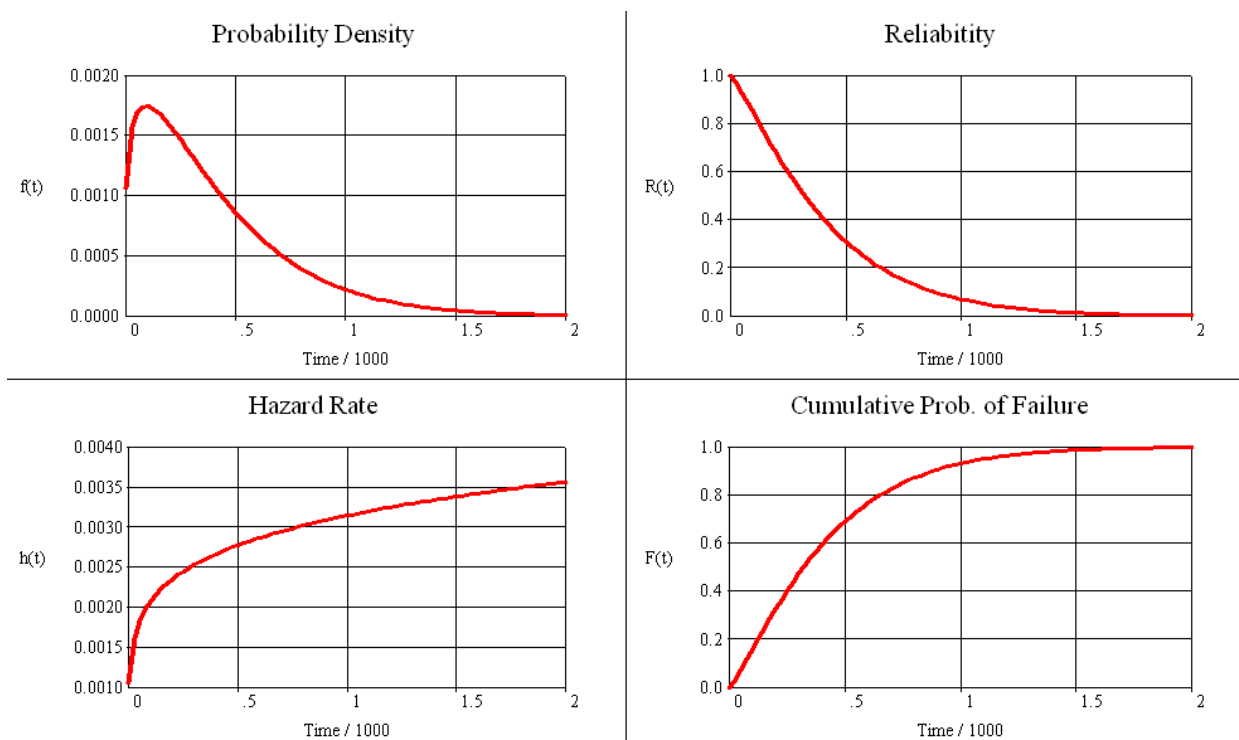
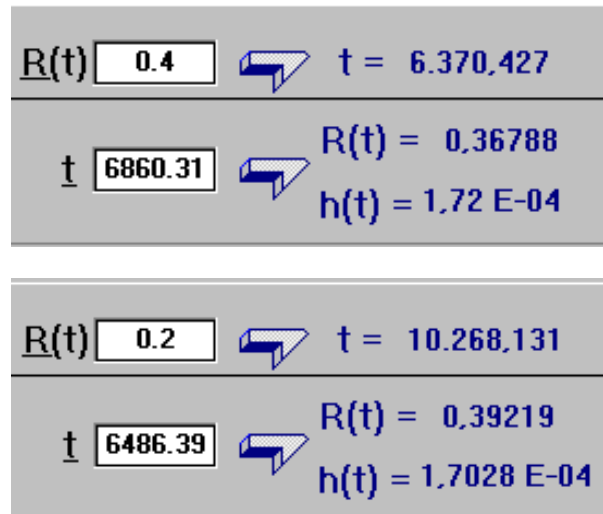
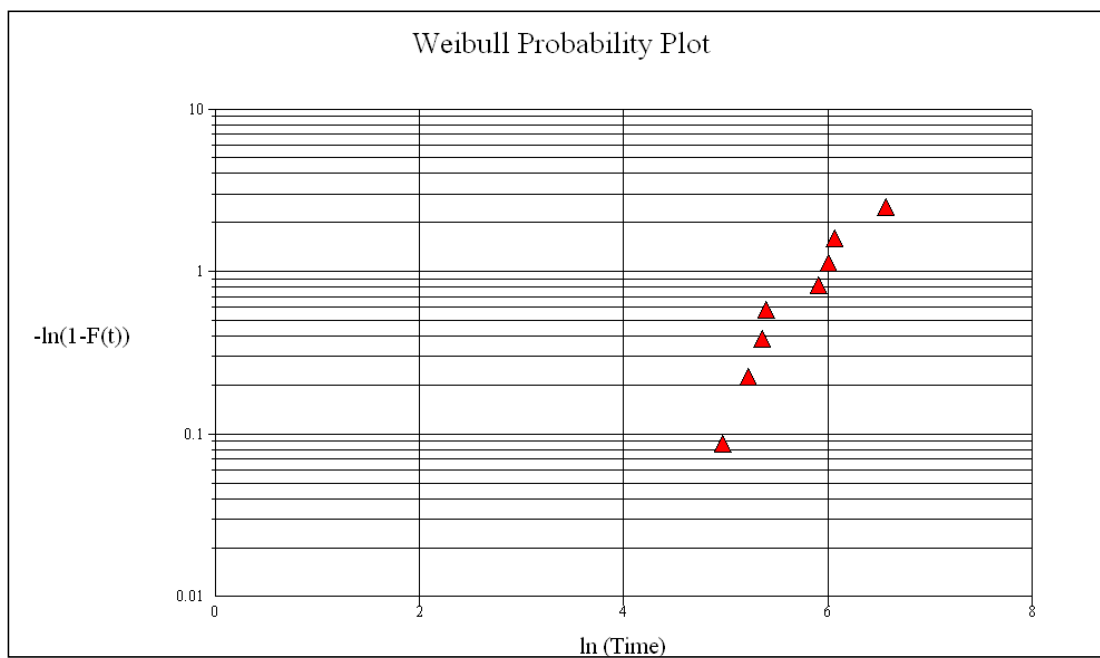


Figura 39. Índices de fiabilidad en función del tiempo del ventilador E 42 del sistema de excitación

5.8.2. Ventilador E 43.

Fechas de fallos Tiempo entre fallas en horas

14/09/2001	3460.60
21/04/2002	5788.64
23/04/2003	6402.11
02/06/2004	2265.12
23/10/2004	3334.76
22/05/2005	2910.05
22/11/2005	11199.76
03/11/2007	6763.9
05/01/2009	



Resultados: $\beta = 1.95$ $\eta = 6037.88$ horas $MTTF = 5354.08$ horas

- Cálculo de la fiabilidad y tasa de fallas para el tiempo de vida característica y tiempo medio entre fallas.

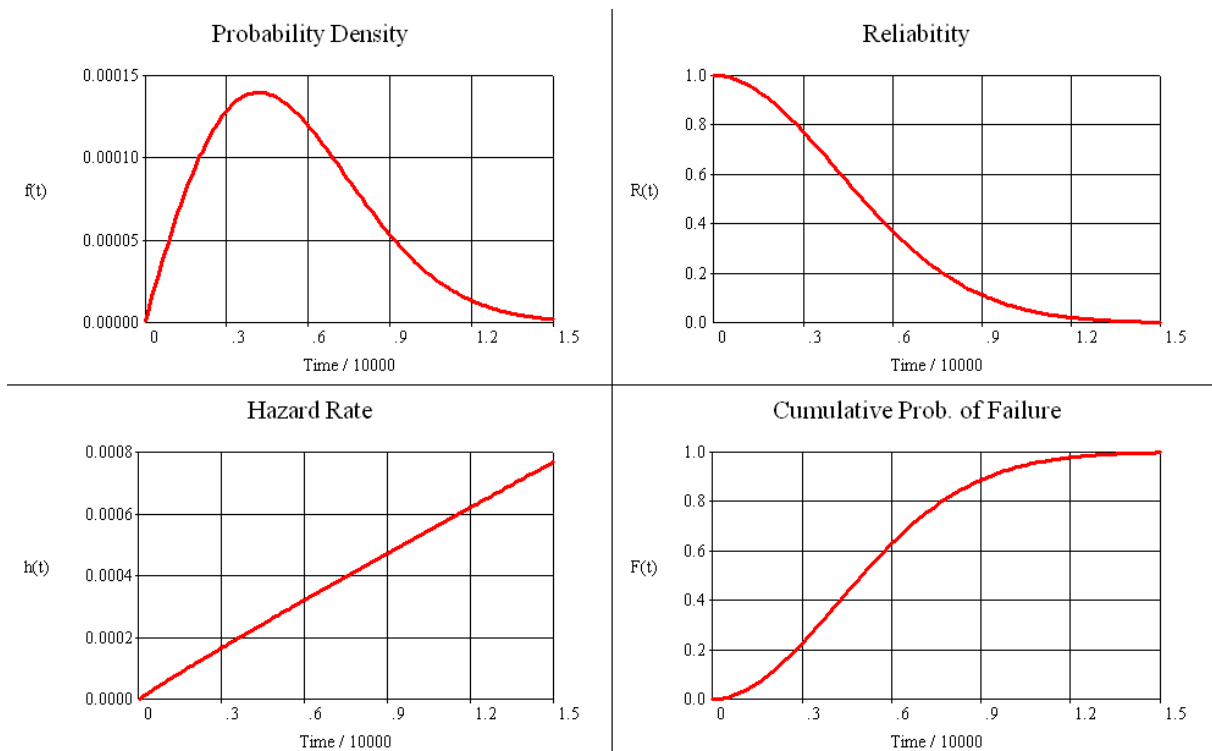
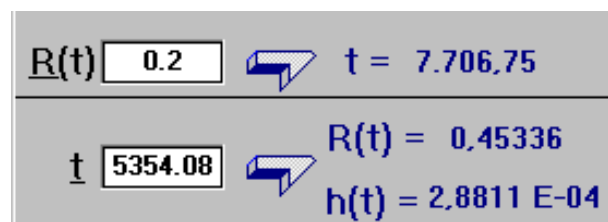
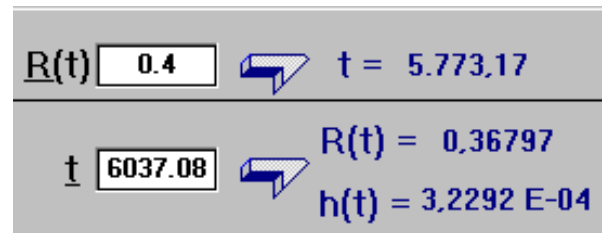


Figura 40. Índices de fiabilidad en función del tiempo del ventilador E 43 del sistema de excitación

5.9. Análisis y discusión de resultados de los índices de fiabilidad de equipos rotativos de la unidad 1.

**TABLA L X I V . R E S U L T A D O S G E N E R A L E S D E E Q U I P O S A N A L I Z A D O S M E D I A N T E
L A F I A B I L I D A D P R Á C T I C A**

Sistem a	E quipo	Fiabilidad	Desconfiabilidad
Hidrogenador	Turbina-generador	81 %	19 %
Transformador	M otobomb as 1 y 2	88.5 %	11.5 %
Frenos y gatos	M otobom ba	89.5 %	10.5 %

5.9.1. Análisis y discusión de resultados del hidrogenador:

La fiabilidad que presenta el hidrogenadores es del 81% , es decir tiene gran probabilidad de buen funcionamiento, y poca probabilidad de falla, que es del 19% , los registros de vibraciones desde el año 2006 hasta el año 2009 lo confirman, estos se han mantenido siempre en valores admisibles de buen funcionamiento.

A pesar de que el hidrogenador es un equipo de gran potencia, los niveles de vibraciones son relativamente bajos ya que la frecuencia de giro es baja (6Hz), lo que justifica su normal comportamiento y lo hace técnicamente fiable.

5.9.2. Análisis y discusión de resultados de las motobombas del transformador.

La fiabilidad que presenta tanto la motobomba 1 como la motobomba 2 es del 88,5%, es la misma ya que son equipos similares que están sometidos a las mismas condiciones de edad medioambiente, ciclo de trabajo, los mismos que en la inspección visual, las pruebas y mediciones prácticamente tuvieron un comportamiento idéntico.

La fiabilidad es alta ya que diariamente se toma registros de las temperaturas del sistema de enfriamiento del aceite del transformador, de tal forma que se evalúa el comportamiento de las motobombas e intercambiadores de calor, de igual forma estos equipos rotativos son monitoreados periódicamente por un sistema de mantenimiento, bimestral, trimestral, semestral y anual.

5.9.3. Análisis y discusión de resultados de la motobomba de frenos y gatos.

La fiabilidad que presenta la motobomba de frenos y gatos es de 89,5%, es decir tiene gran probabilidad de buen funcionamiento y poca probabilidad de falla que es del 10,5%, los registros de vibraciones desde año 2006 hasta el año 2009 lo confirman, estos se han mantenido siempre en valores admisibles de buen funcionamiento.

Su comportamiento es estable ya que esta motobomba tiene poca influencia en el proceso productivo es decir funciona solo cuando se desea levantar el rotor para inspeccionar los cojinetes de empuje de la unidad de generación.

TABLA XV. RESULTADOS GENERALES DE EQUIPOS ANALIZADOS MEDIANTE LA DISTRIBUCIÓN DE WEIBULL

Sistema	Equipo	Parámetro de forma	Parámetro de escala o vida característica (horas)	Habilidad para el tiempo de vida característico	Tiempo medio entre fallos (horas)	Habilidad para el tiempo medio entre fallos	Faé según la curva de Duas
Acumulación y bombeo	Motorbomba 1	1.63	1053883	36.79%	944344	43.34%	3
	Motorbomba 2	1.76	697998	36.79%	621377	44.27%	3
	Motorcompresor	3.23	371998	36.79%	333344	49.59%	3
Agua de enfriamiento	Motorbomba 1	1.48	615817	36.79%	556940	42.24%	3
	Motorbomba de refuerzo 1	3.41	370352	36.79%	332781	49.94	3
	Motorbomba 2	1.5	1059985	36.79%	908021	42.42%	3
	Motorbomba de refuerzo 2	3	48727	36.79%	36983	49.06%	3
Alta presión	Motorbomba	1.67	580157	36.79%	518665	43.63%	3
Ventilación	Ventilador B	1.42	564224	36.79%	513050	41.74%	3
	Ventilador C	1.64	482837	36.79%	432054	43.46%	3
Exhaustión	Ventilador E42	1.18	686131	36.79%	648639	39.22%	3
	Ventilador E43	1.95	605788	36.79%	535408	43.34%	3

Los equipos rotativos están dentro de la fase desgaste, o sea en el intervalo $1 > \beta \geq 4$.

Las fallas frecuentes en esta fase son: Fatiga, corrosión, envejecimiento, fricción, cargas cíclicas, teniendo como consecuencias el aumento de costos de mantenimiento y la indisponibilidad de los equipos.

5.9.4. Para equipos comprendidos de $1 < \beta < 2$.

- **El parámetro de forma (β).** Indica que este equipo ha entrado en un periodo de desgaste primario.
- **La vida característica (α).** Va a ir disminuyendo conforme el parámetro de forma empiece a alejarse de 1, mientras se acerca a 2 tiene una relativa estabilidad.
- **La densidad de probabilidad de falla $f(t)$.** La distribución de fallas es creciente cóncava. Nos indica que al principio de la puesta en funcionamiento el número de fallas ha ido aumentando más en su etapa inicial y ha ido disminuido progresivamente al transcurrir el tiempo.
- **La tasa de falla característica $\lambda(t)$.** Es de tipo creciente, parecida a una recta inclinada, es decir la función es casi directamente proporcional.

La mayor parte de equipos caen dentro de esta etapa.

5.9.5. Para equipos comprendidos de $3 < \beta < 4$.

- **El parámetro de forma (β).** Indica que este equipo se está en un periodo de desgaste fuerte.
- **La vida característica (α).** Disminuirá mucho más que en cualquier otra fase, ya que el desgaste está muy avanzado.
- **La densidad de probabilidad de falla $f(t)$.** Se empieza a asemejar a la distribución normal. Según la forma de esta curva nos indica que la distribución de fallos es uniforme tanto a la derecha como izquierda de su parte central.
- **La tasa de falla característica $\lambda(t)$.** Tiene una distribución de fallas creciente con respecto al tiempo.

5.9.5.1. Recomendación para los equipos en la etapa de desgaste:

- Vigilar y controlar todas las variables técnicas y humanas de mantenimiento.
- Es la etapa propia para acciones preventivas y modificativas de mantenimiento.
- Eventualmente podemos utilizar acciones correctivas y modificativas dependiendo de su costo.
- El costo de ciclo de vida es el principal parámetro con relación al costo de mantener para determinar el momento de reemplazo o modificación sustancial.
- Se usan complementariamente el análisis de modos y efectos de fallos.

5.9.6. Discusión de resultados del comportamiento de los equipos rotativos según la fase en la que se encuentran en la curva de Davies asociada al mantenimiento.

Después del análisis de fiabilidad de equipos rotativos utilizando el registro de fallas determinadas por el análisis vibracional, se obtuvo los siguientes resultados.

TABLA LXVI. REPRESENTACIÓN PORCENTUAL SEGÚN LA SUB ETAPA DE LA FASE DESGASTE

Parámetro de forma	Número de equipos	Porcentaje (%)
$1 < \beta < 2$	9	75 %
$3 \leq \beta \leq 4$	3	25 %
Total	12	

De esta forma se puede ver que el 75 % de los equipos rotativos analizados mediante la distribución de Weibull en la unidad 1 están en la fase de desgaste, es decir se mantienen en la fase considerada como normal de envejecimiento de los materiales que constituyen los equipos rotativos, mientras que el 25 % está en una fase de desgaste avanzado, debido a que las fallas no se detectaron y corrigieron a tiempo.

Las características y causas de cada fase se pueden ver en el ANEXO 4.

5.9.7. Análisis y discusión de resultados según la fiabilidad obtenida mediante el tiempo de vida característica y el tiempo medio entre fallos.

Mediante el análisis de fiabilidad de equipos rotativos con el tiempo de vida característica se llega al límite de fiabilidad del 36.8% , mientras que haciendo el análisis con el tiempo promedio entre fallos se asegura mayor fiabilidad, pero esto representa el aumento de los costos de mantenimiento, si se programa actividades técnicas de inspección, sustitución y reparación en base a este periodo.

La fiabilidad para el tiempo medio entre fallos (MTTF), aumenta para todos los casos, ya que este tiempo es menor que la vida característica, por tanto se puede sugerir que para equipos críticos se utilice el tiempo medio entre fallos como frecuencia de mantenimiento para garantizar una mayor fiabilidad, para equipos semicríticos y no críticos utilizar el tiempo de vida característica para optimizar costos de mantenimiento y prolongar la utilización del equipo hasta el límite de la fiabilidad.

CAPÍTULO VI

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones.

- La unidad de generación que presentó mas fallas desde el año 2001 hasta el año 2009, por la fase AB fue la unidad 1, con 83 fallas, por la fase C fue la unidad 10 con 82 fallas, ya que la diferencia no fue mayor se procedió a comparar entre el número de años de funcionamiento de las dos unidades y se determinó que la unidad 1 venía funcionando desde el año 1983 y la unidad 10 venía funcionando desde el año 1991, por lo que se eligió a la unidad 1, ya que esta unidad tiene 8 años más de funcionamiento con respecto a la unidad 10.
- La categorización de los equipos rotativos según la norma ISO 2372, VDI 2056 y BS 4675 para la severidad de vibraciones, determinó los rangos óptimos de vibraciones para el control y seguimiento de las mismas, complementado la tabla Azima DLI de gravedad de vibración en maquinaria.
- El análisis vibracional nos permitió confirmar las fallas que constituyen nuestra base de datos para el cálculo de los tiempos de buen funcionamiento necesarios para el análisis de fiabilidad, fallas que el equipo analizador detecta, de tal forma que usando los criterios técnicos se complementó el diagnóstico del medidor de vibraciones y se pudo encontrar algunos problemas que el equipo medidor de vibraciones no los indicaba. Según el diagrama de Pareto se pudo determinar que 80% de fallas fueron por deterioro de rodamientos y desbalance. De igual forma

este diagrama, nos permitió determinar que los equipos rotativos que más fallaron fueron los del sistema de ventilación, alta presión y agua de enfriamiento.

- Mediante el análisis de fiabilidad por el método práctico se determinó que la fiabilidad del hidrogenerador fue del 81%, para las motobombas del transformador fue del 88,5%, para la motobomba del sistema de frenos y gatos fue del 89,5%; de tal forma que se puede evidenciar un alto porcentaje de probabilidad de buen funcionamiento, mientras que el porcentaje de desconfiabilidad es relativamente bajo, lo que determina que estos equipos son técnicamente fiables.
- El análisis de fiabilidad mediante la distribución de Weibull determinó que el 75% de equipos rotativos está en el periodo de desgaste inicial comprendido entre $1 < \beta < 2$ con una distribución de fallas creciente cóncava; mientras que el 25% de equipos rotativos está en la etapa de crítica comprendida entre $3 < \beta < 4$, es decir con una distribución de fallas creciente que se aproxima a la distribución normal simétrica.
- Se pudo apreciar que el tiempo medio entre fallos (TMEF), aseguran una fiabilidad entre el 40% y 50%, mientras que con el tiempo de vida característica o vida esperada se llega al límite de fiabilidad del 36.8%.

6.2. Recomendaciones.

- Dado que la unidad de generación que presentó la mayor cantidad de fallos, se recomienda prestar mayor atención a los sistemas de ventilación, alta presión

y agua de enfriamiento, que son los que generaron la mayor cantidad de fallos de desbalance y deterioro de rodamientos.

- ' Para el análisis de espectros se recomienda la utilización unidades de velocidad en mm/s , ya que al utilizar la unidad de velocidad en decibeles existe muchas señales de ruido que se manifiestan en el espectro de tal forma que dificultan en la interpretación de los mismos.

- ' En los equipos analizados mediante la fiabilidad práctica donde no existió registro de fallos mediante la técnica del diagnóstico de vibraciones, para complementar su estudio se recomienda hacer un análisis de fiabilidad con el registro de fallos general detectado mediante otras técnicas de monitoreo, para de esta forma determinar su parámetro de forma de tal manera que nos permita puntualizar la etapa en su ciclo de vida y el parámetro de escala o vida característica de tal forma que nos indique el tiempo para realizar actividades preventivas de mantenimiento.

- Los equipos tales como motobombas de refuerzo del sistema de agua de enfriamiento de la unidad y motocompresor del sistema de regulación se recomienda hacer el análisis de modos y efectos de fallas complementada con el análisis de costo de ciclo de vida para determinar si es conveniente seguirlos manteniendo o mejor resulta su sustitución. De igual forma para los equipos rotativos cuyo parámetro de forma está en la etapa de desgaste inicial se debe controlar todas las variables técnicas y humanas de mantenimiento. Esta etapa es

propicia para acciones preventivas y modificativas de mantenimiento.

- Para equipos críticos se recomienda utilizar como frecuencia de inspección y mantenimiento total: el tiempo medio entre fallos ya que es el que asegura la mayor fiabilidad y para equipos semicríticos y no críticos se recomienda el tiempo de vida característica ya que este asegurará el límite óptimo de fiabilidad lo que nos permite disminuir los costos de mantenimiento.